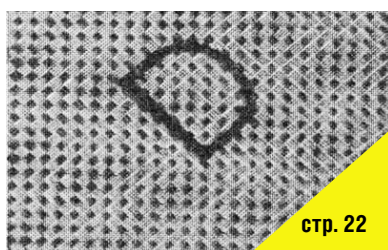


№11 СОДЕРЖАНИЕ



стр. 8



стр. 22



стр. 28



стр. 34

Технологии

В.А. Елхов, Н.В. Кондратьев, Ю.Н. Овечкис, Л.В. Паутова
Безочковая система показа объёмных многокурсовых киноизображений 2

С.И. Озеров
Интегральное стереокино по трём снятым ракурсам 8

А.С. Гончаров
Голографический литограф для изготовления фотошаблонов, используемых при производстве широкоформатных дисплеев 17

Е. Усович
Архивная оптико-голографическая система памяти для хранения фильмов и телепередач 22

Страницы истории кино

Н.А. Майоров
Кругорамные системы кинематографа 28

Мастер-класс, семинары, новости SMPTE, отзывы

О.В. Андреева
Терминологический словарь по прикладной голографии 33

SMPTE Motion Imaging Journal by Thomas O. Maier, пер. В. Сычёва
Обработка цвета для цифрового кинематографа 1: Основные положения, кодирующие и декодирующие равенства, кодирование цветного базиса и показатель степени (1/2.6) 34

SMPTE Motion Imaging Journal by Thomas O. Maier, пер. В. Сычёва
Обработка цвета для цифрового кинематографа 2: Объяснение констант 4095 и 52.37, Белых Точек и Чёрного 41

Требования для публикаций научных статей в журнале «МИР ТЕХНИКИ КИНО»

1. Статья представляется на электронном носителе, либо по почте Kevin@paradiz.ru не более 40 000 знаков;
2. Рисунки должны быть отдельно в JPG или TIF с разрешением не менее 300 dpi;
3. Статьи должны содержать:
 - аннотацию (или реферат) на русском и английском языках;
 - ключевые слова;
 - библиография должна быть на русском и английском языках;
4. Плата с аспирантов за публикацию не взимается.

Подписной индекс Роспечать: № 81923

Научно-технический журнал «Мир Техники Кино»
Выходит 4 раза в год
Издатель: ООО «ИПП «КУНА»
Учредители: ОАО «НИКФИ», ООО «ИПП «КУНА»
при поддержке Министерства культуры Российской Федерации. Издание включено в систему Российского индекса научного цитирования. (www.elibrary.ru)

Редакционный совет:
Комар Виктор Григорьевич, проф., д.т.н.
Сакварелидзе Майя Александровна, д.х.н.
Тимофеев Александр Евгеньевич, к.т.н.
Блохин Александр Сергеевич, к.т.н.
Ковалевская Нонна Сергеевна, к.т.н.
Лишин Лаврентий Григорьевич, к.т.н.
Волков Александр Сергеевич, Министерство культуры Российской Федерации

Руководитель проекта:
Костылев Олег Юрьевич

Главный редактор:
Егоров Владимир Викторович

Выпускающий редактор:
Захарова Тамара Владимировна

Арт-директор, оформление обложки:
Шишкин Владимир Геннадьевич

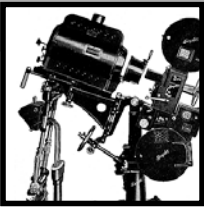
Вёрстка и дизайн:
Саксина Мария Васильевна
Корректор:
Сайкина Наталья Владимировна

Отпечатано в ООО «Типография ПАРАДИЗ»
Объем 6 п.л. Заказ № 1410.
Тираж 1500 экземпляров.

Свидетельство о регистрации
СМИ-ПИ № ФС77-28384 от 23 мая 2007 года.

Перепечатка материалов осуществляется только с разрешения редакции, ссылка на журнал обязательна. Редакция не несёт ответственности за достоверность сведений о рекламе и объявлениях. Мнение редакции не всегда совпадает со взглядами авторов статей.

www.mtk-magazine.ru, e-mail: kevin@paradiz.ru
телефон (факс): +7 (495) 795-02-99, 795-02-97



БЕЗОЧКОВАЯ СИСТЕМА показа объёмных многокурсных киноизображений

В.А. Елхов, д.ф.-м.н.,
Н.В. Кондратьев,
Ю.Н. Овечкис, д.т.н.,
Л.В. Паутова, к.т.н.,
ОАО «НИКФИ»

Коммерческий показ безочкового стереокино на основе линзово-растровой системы, разработанной в НИКФИ, проводился в Москве ещё в 40-х годах прошлого столетия. Существенным недостатком данного метода был малый размер индивидуальной зоны видения, т.к. при показе стереофильма демонстрировались только два ракурса отснятой сцены.

Для решения этой проблемы мы предлагаем использовать цифровую многокурсную видеопроjectionную систему с модульным принципом конструкции, где увеличение общего числа пикселей формируемого стереоизображения достигается путём мультиплицирования проекционных каналов. Предложенная модульная проекционная автостереоскопическая система для демонстрации стереокино включает в себя просветный экран, линзовый растр, расположенный перед экраном, несколько проекторов и блок формирования фрагментов параллакс-панорамограммы. С помощью этого блока параллакс-панорамограмма разбивается на фрагменты, количество которых соответствует числу проекторов. Прямоугольные фрагменты наклонного растра состыковываются в единый лист для формирования линзового растра большого размера. Для получения требуемого фокусного расстояния линз растра используется иммерсия — смесь глицерина с водой. Иммерсия также позволяет сделать стыки листов растра практически незаметными для зрителя.

Для проверки эффективности принципов построения такой системы изготовлен экспериментальный образец.

Введение

■ В последнее время во всём мире значительно усилился интерес разработчиков к проблемам создания систем съёмки и демонстрации объёмных фильмов. При этом основные успехи достигнуты на пути применения очковых систем с поляризационными либо жидкокристаллическими очками [1]. Несмотря на относительную простоту реализации таких систем, необходимость использования очков накладывает определённые ограничения. Во-первых, это соображения гигиены и неудобство надевать вторую пару очков, если зритель имеет свои собственные. Во-вторых, очковые стереопарные системы не предоставляют зрителю возможность оглядывания объёмного изображения (пусть и в малых пределах). Поскольку в каждый глаз всегда попадает одна и та же картинка из стереопары, то при смене позиции зрителя наблюдаемая сцена деформируется неестественным образом. Такое несоответствие реальности воспринимается как искажение видимого пространства и является недостатком очковых систем. Его можно нивелировать применением систем слежения за положением головы наблюдателя и соответствующей корректировкой предъявляемой зрительной информации. Однако такой метод применим только для одного наблюдателя и совершенно непригоден для демонстрации объёмных фильмов в кинотеатре.

Реальной альтернативой очковым методам является использование растровых систем, в частности, проекции так называемой параллакс-панорамограммы на просветный растровый экран. Параллакс-панорамограмма представляет собой сложное изображение, составленное из большого числа последовательно чередующихся элементов изображения одного и того же объекта, снятых с различных ракурсов [2]. В основе лежит свойство растра разделять в пространстве лучи, исходящие из разных точек экрана, расположенного вблизи фокальной плоскости растра. Растровые методы проекции объёмных изображений активно развивались в 40-х – 50-х годах прошлого столетия. Для сепарации ракурсов стереоскопического изображения здесь используются щелевые или линзовые растры, установленные рядом с рассеивающим экраном. В случае отражательного экрана используется один растр, в случае просветного — два с разных сторон от рассеивающей поверхности. Стереоскопическая кинопроекция осуществлялась с помощью двухобъективного проекционного аппарата с киноплёнки, на которой были зафиксированы два ракурса снимаемой сцены.

По этой системе в Москве некоторое время работал безочковый стереокинотеатр, где проекция осуществлялась на перспективный линзорастровый экран, предложенный С.П. Ивановым [3]. Основным недостатком такой стереопарной проекции является ограниченность зоны

видения, максимальный размер которой в идеальных условиях составлял 130 мм. Зрители были вынуждены сидеть практически неподвижно во время сеанса.

Увеличить размеры зоны видения можно, используя многостереопарную проекцию на растровый экран. Однако, реализовать такую систему в традиционном плёночном кинематографе было весьма затруднительно. Проблемы имели место и на этапе многоракурсной съёмки фильма, и при многостереопарной проекции, т.к. необходимо было организовать продергивание плёнки через несколько (например, восемь) кадров.

В настоящее время, с развитием методов и средств цифрового кинематографа, представляется реальным вернуться к разработкам прошлых лет в части создания многостереопарной безочковой проекции. Использование современной вычислительной и видеопроекционной техники обеспечивает следующие преимущества:

- создание параллакс-панорамограммы в цифровом виде;
- фиксированное цифровое растривание изображения;
- возможность многоракурсной проекции благодаря тому, что зоны видения создаются уже сформированной параллакс-панорамограммой и не связаны со зрачками объективов;
- возможность цифровой обработки – интерполяция промежуточных ракурсов при исходной съёмке двумя – тремя объективами.

В настоящее время для рекламных целей появились растровые безочковые устройства, формирующие объёмное динамическое изображение в пространстве перед экраном и за экраном. Такие устройства реализованы на базе жидкокристаллических или плазменных панелей, перед которыми установлен растр. Число ракурсов многостереопарного изображения около десяти. Однако увеличение числа ракурсов приводит к пропорциональному уменьшению разрешения в наблюдаемом изображении.

Повысить число элементов в каждом ракурсе можно путём использования модульной проекционной многостереопарной системы, рассматриваемой в данной работе, то есть путём мультиплицирования проекционных каналов. В каждом таком канале формируются соответствующие фрагменты изображения, которые пространственно совмещаются на растровом проекционном экране. Применение цифровых методов формирования стереоскопических изображений и их проекции обеспечивает возможность практической реализации такой системы.

1. Основные соотношения

Принципиальная схема отдельного модуля устройства показана на рис. 1. В проекционной системе с растровым экраном можно выделить три оптически сопряжённые плоскости:

- плоскость проекции 1;
- плоскость растра 2;
- плоскость наблюдения (зон видения) 3.

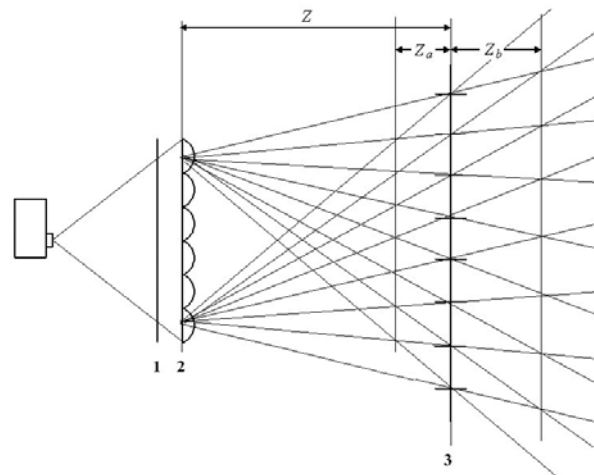


Рис. 1. Принципиальная схема отдельного модуля устройства

Специально подготовленные компьютером изображения последовательности параллакс-панорамограмм проецируются на просветный экран, расположенный в плоскости проекции.

Плоскость проекции и плоскость зон видения являются сопряжёнными относительно линз растра, составленного из цилиндрических линз с фокусным расстоянием f и шагом d :

$$\frac{1}{Z} + \frac{1}{s} = \frac{1}{f}, \quad 1)$$

где Z – расстояние от экрана до плоскости наблюдения, s – расстояние от плоскости проекции до плоскости растра.

В горизонтальной плоскости каждая линза переносит изображение части экрана, находящейся за ней, с изменением масштаба по законам геометрической оптики. Поэтому из каждой точки, расположенной в плоскости наблюдения, будут видны только точки экрана, находящиеся на продолжении линий, соединяющих точку наблюдения с центрами линз. Так как в вертикальном направлении цилиндрические линзы не меняют ход лучей, наблюдатель будет видеть из каждой точки плоскости наблюдения элементы экрана, расположенные на узких вертикальных полосах, проходящих через эти точки. В соседнем положении глаз увидит картину, образованную соседними полосами на экране, и т.д. Таким образом, если на экран спроецировать изображение, сформированное подходящим образом, так называемую параллакс-панорамограмму, можно добиться, чтобы зритель видел из разных положений разные изображения.

Обязательным условием является незаметность растровой структуры. Это будет соблюдено, если шаг растра с точки наблюдения не превышает одной угловой минуты. При этом полосы сольются в единое изображение плоскости экрана. Наблюдатели должны располагаться вблизи плоскости наблюдения, которая делится на отдельные индивидуальные зоны видения, каждая из которых имеет протяжённость D , определяемую соотношением

$$D = \frac{Zd}{f}, \quad (2)$$

при условии $Z \gg f$, естественном для кинозала.

Глубина индивидуальных зон определяется соотношениями (3):

$$\begin{aligned} Z_a &= \frac{D}{X+D} Z && \text{– граница зон в направлении экрана,} \\ Z_b &= \frac{D}{X-D} Z && \text{– граница зон позади плоскости наблюдения,} \end{aligned} \quad (3)$$

где X – размер экрана в горизонтальном направлении.

Данные соотношения существенно ограничивают количество зрителей, которые могут одновременно наблюдать качественное стереоизображение. Преодоление этого ограничения возможно, если использовать перспективные линзовые растры [3].

При применении в качестве устройства, формирующего параллакс-панорамограмму цифрового проектора, минимальный элемент каждого ракурса определяется размером пикселя в проекционной плоскости. Каждая зона видения делится на зоны наблюдения отдельных ракурсов. Увеличение числа ракурсов приводит к более плавным переходам при изменении позиции зрителя, но требует увеличения количества проекторов, поскольку их число определяется требованием получения высокого качества изображения. Если исходить из необходимости сохранения разрешения, присущего одному проектору, то число проекторов по горизонтали будет равняться числу ракурсов. Разрешение по вертикали не уменьшается, поэтому возможны два варианта построения системы:

- использование анаморфических объективов для расширения изображения в вертикальной плоскости;
- межстрочное перераспределение ракурсов, используя избыточность по вертикали.

Первый путь требует расчёта, разработки и изготовления специальной анаморфотной оптики. Второй путь основан на применении наклонного растра [4].

В идеальной системе резкость изображения по горизонтали определяется размером линзы d , или в угловых

единицах $\delta = \frac{d}{Z}$, и не зависит от того, где по глубине

располагается изображаемый объект. Однако в реальной системе, в силу ряда причин (неидеальность линз растра, геометрические искажения параллакс-панорамограммы, недостаточное разрешение оптики и рассеивающего экрана, применение наклонного растра и т.д.), в глаз, кроме нужного ракурса, могут попадать соседние ракурсы. Рассмотрим такой случай (рис. 2). Предположим, что глаза наблюдателя находятся в зонах, соответствующих ракурсам с номерами i и $i+k$.

При отображении произвольной точки P , в идеальном случае, в глаза попадут её изображения, расположенные за линзами растра, соответствующими её параллаксу, с номерами j и $j+r$. В реальных системах в глаза могут дополнительно попадать то или иное количество (n) сосед-

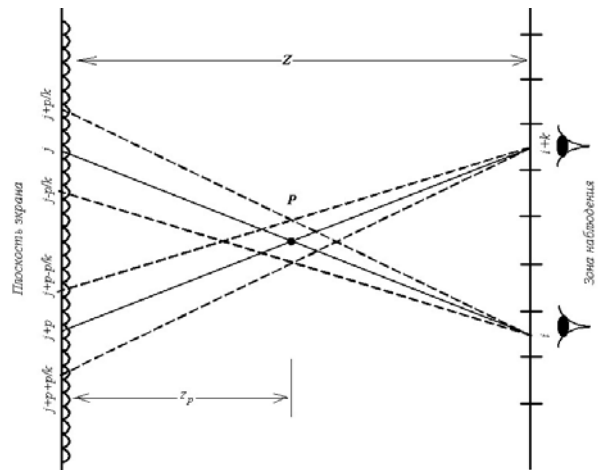


Рис. 2. Схема наблюдения ракурсов параллакс-панорамограммы в реальной многоракурсной проекционной системе с линзовым растром

них ракурсов. Нетрудно убедиться, что их изображения расположены за линзами на расстоянии, кратном p/k (на рисунке отображены только соседние «паразитные» ракурсы). Эти изображения, слившись в единый объёмный образ, приведут к размытию изображаемой точки, размер изображения которой (Δ_p) в плоскости экрана равен

$$\Delta_p \approx d + \frac{2pnd}{k}, \quad (4)$$

или в угловых единицах

$$\delta_p = \frac{\Delta_p}{Z} \approx \left(1 + \frac{2pn}{k}\right)\delta \quad (5)$$

Связь между линейными координатами и номерами зон определяется соотношением

$$\frac{z_p}{Z - z_p} = \frac{pd}{kb}, \quad (6)$$

где b – размер зоны видения одного ракурса, что приводит к следующей зависимости:

$$\delta_p = \frac{\Delta_p}{Z} \approx \left(1 + \frac{2z_p nb}{(Z - z_p)d}\right)\delta \quad (7)$$

Выражение (7) можно представить в виде:

$$\delta_p = \frac{\Delta_p}{Z} \approx \delta + 2n\delta_b \frac{z_p}{(Z - z_p)}, \quad (8)$$

где $\delta_b = \frac{b}{Z}$ – угол, под которым видна зона наблюде-

ния одного ракурса с расстояния Z .

Легко убедиться, что для точек в заэкранной области соответствующее выражение имеет вид:

$$\delta_p = \frac{\Delta_p}{Z} \approx \delta + 2n\delta_b \frac{z_p}{(Z + z_p)} \quad (9)$$

Зависимости относительного углового разрешения $\frac{\delta_p}{\delta}$ от относительного расстояния изображаемого плана от

экрана $\frac{Z_p}{Z}$, соответствующие выражениям (8) и (9), приведены на рис. 3. Отрицательные значения $\frac{Z_p}{Z}$ соответствуют предэкранному расположению плана, положительные – заэкранному. Кривая 1 соответствует значению $\frac{n\delta_b}{\delta} = 5$, кривая 2 – $\frac{n\delta_b}{\delta} = 10$, кривая 3 – $\frac{n\delta_b}{\delta} = 15$.

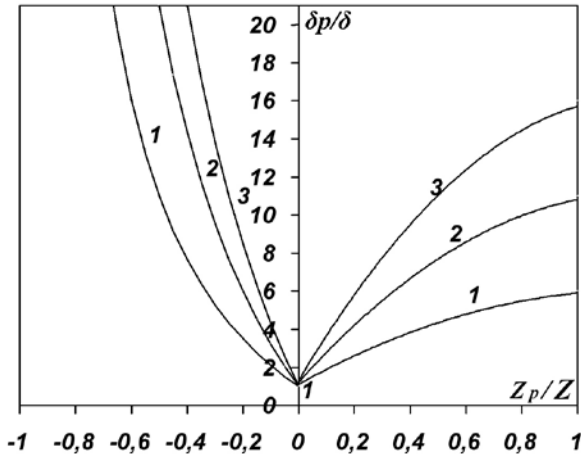


Рис. 3. Зависимость относительного углового разрешения от относительного расстояния

Видно, что область приемлемого ухудшения разрешения уменьшается с ростом числа «паразитных» ракурсов, попадающих в глаз, и увеличивается с уменьшением зоны наблюдения отдельного ракурса. При этом приведённые выражения позволяют рассчитать достижимые параметры объёмного изображения по разрешению при заданных характеристиках системы.

2. Расчёт кинозала

Оценим возможные геометрические параметры кинозала, в котором реализована предложенная модульная автостереоскопическая система показа объёмных изображений, используя при этом полученные выше выражения.

Пусть горизонтальный размер экрана $X = 3$ м, расстояние от экрана до среднего ряда $Z = 7,5$ м. Полагая угловой размер линзы растра около 1 угловой минуты, что обеспечивает незаметность его линиатуры, получаем для выбранного расстояния величину шага растра примерно 2,5 мм, т.е. 10 линий/дюйм. Следовательно, на экране по горизонтали должно разместиться 1180 цилиндрических линз (с учётом угла наклона линзового растра). При схеме с наклонным растром и с 15-ю ракурсами в зоне видения (5 – по горизонтали и 3 – по вертикали) получаем 5900 пикселей по горизонтали. Примерно такую величину можно обеспечить, разместив в горизонтальном направлении три видеопроектора с разрешением 1920x1080 каждый. При этом разрешение по вертикали составит $1080:3 = 360$ пикселей. Добавив второй ряд из трёх аналогичных проекторов, получим общее число пикселей

в вертикальном направлении 720. Вертикальный размер экрана составит 1,125 м. Отметим, что, несмотря на то, что такое соотношение сторон (3:1,125) не является общепринятым, с нашей точки зрения, оно вполне пригодно именно для объёмного показа.

Для стандартного соотношения сторон экрана, соответствующего матрице проекторов, необходимо установить третий ряд видеопроекторов, после чего размеры экрана составят (3x1,6) м². Следует иметь в виду, что, несмотря на существенное увеличение количества видеопроекторов, общая стоимость системы не становится чрезвычайно высокой. Это объясняется тем, что в данной системе, во-первых, каждый проектор «обслуживает» лишь часть экрана, а во-вторых, растровый экран обладает в горизонтальном направлении фокусирующими, т.е. светосильными свойствами. Поэтому в системе достаточно применять проекторы с небольшими световыми потоками (2000–2500 ANSY lm), цена которых относительно невысока.

Фокусное расстояние линз растра выбирается из условия формирования на заданном расстоянии Z , последовательности зон видения с поперечным размером $D = 300$ мм. Тогда поперечный размер зоны наблюдения каждого из 15-ти ракурсов составит 20 мм.

При определении количества зрительских мест следует иметь в виду, что кресла в ряду должны располагаться с шагом, кратным поперечному размеру зоны видения, которая составляет в нашем случае 300 мм. При ширине просмотровой зоны 6 метров и ширине кресел 0,6 м получаем, что в один ряд можно разместить 10 зрителей. Так как глубина зоны видения, согласно приведённым выше формулам, составляет 0,68 м в сторону экрана и 0,83 м в противоположном направлении, то становится возможным расположить в шахматном порядке перед и за данным рядом ещё два ряда кресел. Число зрителей в этих двух рядах составит дополнительно 18 человек. Как показывают расчёты, при условии расположения изображаемых объектов с большим параллаксом в центральной зоне экрана (примерно 50% ширины экрана), дополнительные ряды можно разместить на расстоянии 0,7–0,8 м при сохранении достаточно комфортной зоны видения 20 см. При этом сохраняется кратность шага кресел поперечному размеру зоны видения.

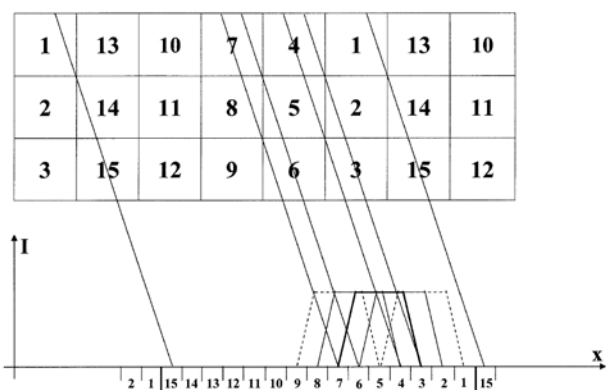


Рис. 4. Распределение энергии в зоне видения

Оценим возможную глубину объёмного изображения в рассматриваемой автостереоскопической системе объёмной проекции с выбранными геометрическими параметрами. При этом рассматривается система с наклонным растром, когда в каждый глаз даже в идеальной системе всегда попадают несколько ракурсов объёмного изображения, но с разной световой энергией. Схематически распределение энергии в зоне видения для такого случая представлено на рис. 4. Крайние наклонные жирные прямые задают границы одной из линз линзового раstra, наложенной на фрагмент изображения. Каждый пиксель из группы, состоящей из 15 пикселей, формирует в зоне видения элементарную зону наблюдения соответствующего ему ракурса. В качестве примера распределение энергии от пикселя, соответствующего 5-ому ракурсу, обозначено жирной линией трапеции. Распределение энергии для соседних ракурсов показано тонкими линиями, для следующих – пунктирными. Нетрудно видеть, что основное влияние на уменьшение резкости оказывают только соседние ракурсы, в то время как энергетическая составляющая более удалённых ракурсов пренебрежимо мала. Поэтому в выражениях (4)–(9) можно принять $n = 1$,

и получаем соотношение $\frac{n\delta_b}{\delta} = \frac{1 \cdot 20}{2,5} = 8$. Данная величина

примерно соответствует зависимости 2 на рис. 3. Пусть наихудшее угловое разрешение элементов объёмного изображения в наиболее удалённых от экрана планах составляет 4 угловых минуты, что соответствует удовлетворительному качеству кинематографического изображения. Тогда согласно приведённым выше выражениям для рассматриваемой конфигурации и

отношения $\frac{\delta_p}{\delta} = 4$ получаем, что глубина воспроиз-

водимого пространства с данным качеством изображения лежит в пространстве от $0,15Z = 1,25$ м перед экраном до $0,25Z = 1,875$ м за экраном.

Важно отметить, что выбранный критерий характерен для медленно перемещающихся элементов изображения, когда зритель имеет возможность достаточно подробно их рассмотреть. В то же время для динамичных объектов (например, «вылетающие» в зал предметы) этот критерий можно существенно смягчить.

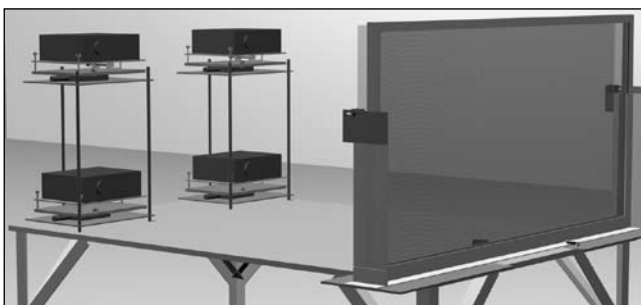


Рис. 5. Макет экспериментального образца автостереоскопической проекционной системы

3. Экспериментальный образец

Для экспериментальной проверки изложенных выше принципов построения разрабатываемой системы в ОАО «НИКФИ» был разработан и изготовлен экспериментальный образец автостереоскопической проекционной системы для демонстрации объёмных кинематографических изображений. Система включает в себя четыре смежных проекционных канала (рис. 5), состыкованных по два в горизонтальном и вертикальном направлениях. Каждый проекционный канал включает в себя портативный видеопроектор Sanyo OMLPC-WXU10 с разрешением 1280x800, установленный на платформе, снабжённой необходимыми юстировочными приспособлениями. Фрагменты единого многоракурсного киноизображения формируются и подаются на проекторы с помощью управляющей электронной системы. Видеофрагменты объединяются на едином просветном экране, устройство которого приведено на рис. 6. Экран представляет собой линзовый растр, помещённый в кювету, наполненную раствором глицерина в воде, и расположенный перед ним просветный рассеивающий материал, зажатый между двумя стеклянными пластинами.

Для использования в разрабатываемом образце был выбран линзовый растр с плотностью 10 линз/дюйм, используемый для создания стерео- и вариоскопических изображений в рекламе и пр. Исходное фокусное расстояние линз раstra составляло 3,5 мм, что является недостаточным для разрабатываемого экспериментального образца. Для того чтобы обеспечить параметры, необходимые для кинопроекции в разрабатываемой системе, растр был помещён в кювету с иммерсионной жидкостью. В качестве иммерсионной жидкости использовалась смесь глицерина с водой. Экспериментально подобранная концентрация позволила увеличить фокусное расстояние до требуемой величины, равной 36 мм. Просветный рассеивающий экран располагался вблизи фокальной поверхности преобразованного раstra. Размер растрового экрана составляет $(1,54 \times 0,76)$ м².

Максимальный размер таких линзовых растров, доступных на рынке, (220×115) см², причём линзы параллельны длинной стороне. В нашей системе использовался наклонный растр с углом наклона линз примерно 18,5°. Прямоугольные фрагменты наклонного раstra размером (77×76) см² вырезались из исходных листов и состыковывались в единый лист. Наличие иммерсии позволяло сделать стыки листов раstra практически незаметными для зрителя.

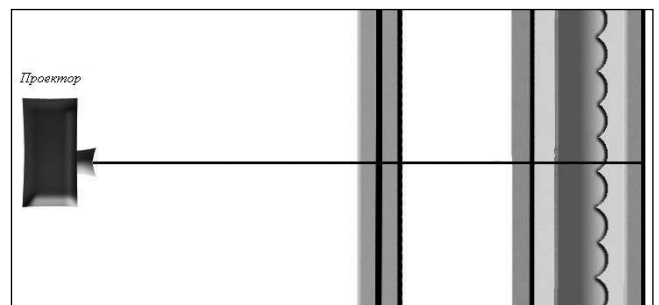


Рис. 6. Схема устройства линзового раstra

К просветному рассеивающему материалу предъявляются весьма противоречивые требования. Во-первых, он должен иметь достаточно широкую индикатрису рассеяния, чтобы обеспечить незаметность стыков фрагментов изображения. Во-вторых, он должен быть достаточно тонким и иметь высокое разрешение, чтобы воспроизвести без потери контраста каждый пиксель изображения параллакс-панорамограммы. С достаточной степенью точности этим требованиям удовлетворил экранный материал STUDIO фирмы GERRIETS, обладающий при высокой разрешающей способности практически плоской индикатрисой рассеяния в углах, превышающих $\pm 30^\circ$.

При выбранной конфигурации расстояние от экрана до плоскости наблюдения Z составило 4 м, а размер зоны видения 30 см. Каждая зона видения содержала 12 ракурсов, формируемых прямоугольными областями по четыре пикселя из трёх смежных строк. Данные параметры при выбранном размере экрана обеспечивали формирование стереоскопического изображения, каждый из 12 ракурсов которого содержал 575 элементов по горизонтали и 378 элементов по вертикали.

Основные технические характеристики системы:

Размеры экрана, м ²	1,54x0,76
Проекционное расстояние, м	1,6
Расстояние наблюдения, м	4
Разрешение (пиксели)	575x378
Число ракурсов	12
Размер индивидуальных зон видения по горизонтали, мм	300
Линзовый растр:	
шаг, мм	2,5
фокусное расстояние, мм	36

Изображение, подающееся на проектор, представляет собой синтез 12 ракурсов, сформированных таким образом, что в каждую группу пикселей размером 4x3 попадает по одному пикселю из каждого ракурса. Такое изображение нельзя сжимать каким-либо методом, так как любая сопутствующая процессу сжатия потеря информации приводит не просто к ухудшению изображения, а к потере информации о соседних ракурсах. Интегральный поток видеoinформации, поступающий из памяти через видеокарты к проекторам, составляет более 200 мегабайт в секунду. Это более чем в 100 раз больше потока DVD качества. В связи с этим была разработана управляющая электронная система, удовлетворяющая этим требованиям.

При создании синтезированного многоракурсного стереофильма производилось объединение 12 фильмов, «снятых» с разных точек, в единый видеофильм – параллакс-панорамограмму. Для реализации автоматической обработки применялся разработанный нами алгоритм кодирования с использованием видео редактора и модифицированной технологии масок прозрачности. Таким образом, был создан трёх минутный демонстрационный цифровой фильм, состоящий из кукольной анимации и синтезированных на компьютере фрагментов. Глубина объёмного изображения для динамичных объектов

с приемлемым качеством составила до 1 м в предэкранном пространстве и более 1 м в заэкранном пространстве.

Экспериментальный образец подобной системы демонстрировался на международной выставке «КИНО ЭКСПО 2008» в Санкт-Петербурге в сентябре 2008 г. (рис. 7), где вызвал значительный интерес у специалистов.



Рис. 7. Фото с международной выставки «КИНО ЭКСПО 2008»

Заключение

Проведённые в работе теоретические оценки и экспериментальные результаты показали, что на основе предложенного модульного принципа построения автостереоскопической системы показа объёмных изображений становится вполне реальным создание небольшого, на несколько десятков зрительских мест, безочкового стереоскопического кинотеатра. Ограничения по глубине воспроизводимого пространства, вызванные наклонным растром, могут быть существенно уменьшены путём применения вертикального или перспективного растра. Для этого требуется использовать специальную оптику, обеспечивающую необходимые преобразования проекционного изображения (анаморфирование) при сохранении разрешающей способности.

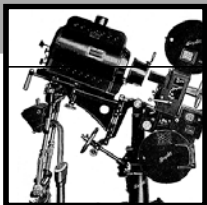
В таком кинотеатре могут демонстрироваться анимационные фильмы, как синтезированные на компьютере, так и кукольные, снятые кадрами с различных ракурсов. Возможен также монтаж указанных вариантов с обычными плоскими игровыми фрагментами. Отметим, что в настоящее время в ОАО «НИКФИ» начата разработка съёмочного комплекса для многоракурсной съёмки игровых и натуральных сцен.

Благодарности: Авторы благодарны А.Е. Тимофееву и С.Н. Рожкову за проявленный интерес к работе и стимулирующие обсуждения.

Разработка проведена при финансовой поддержке Министерства культуры Российской Федерации. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. *Chinnok Chris.* The Many Ways to Create a 3-D Image, SMPTE Motion Imaging Journal, May/June, 26-30, 2008.
2. *Валюс Н.А.* Стереоскопия. М.: АН СССР, 1962. С. 580.
3. *Иванов С.П., Андриевский А.Н.* Проекционный экран. Авторское свидетельство СССР 81626, 1943.
4. *Cornelis van Berkel et al.* Autostereoscopic display apparatus, U. S. Patent 6064424, 2000.



ИНТЕГРАЛЬНОЕ СТЕРЕОКИНО по трём снятым ракурсам

С.И. Озеров,
аспирант
ОАО «НИКФИ»

Разработана новая компьютерная программа получения из двух изображений сцены (снятой в двух ракурсах) множества изображений промежуточных ракурсов.

Программа основана на оригинальных методах математического синтеза изображений:

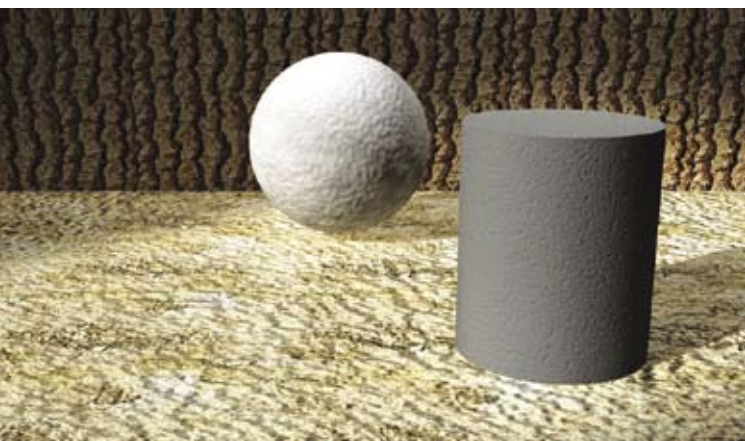
1. сравнение соответствующих строк в изображениях вместо обычного сравнения между собой многострочных фрагментов изображений;

2. полный перебор всех без исключения вариантов модели, с выбором из всего колоссального множества решений оптимального решения, которое даёт наилучшее соответствие пикселя синтезированного изображения пикселям двух исходных изображений, вместо обычно применяемого сравнения групп, состоящего из большого числа пикселей;

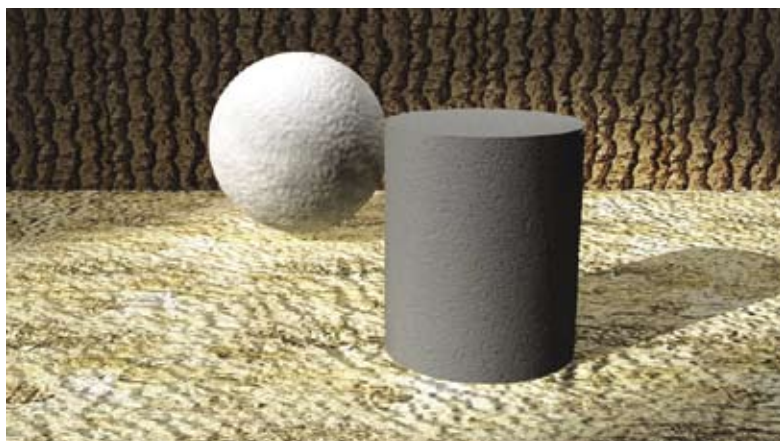
3. использование в процессе съёмки и синтеза третьего референсного изображения для повышения точности при определении пикселей двух основных изображений, соответствующих единому элементу снятого изображения;

4. каркасный метод сравнения пикселей, при котором сначала производится сравнение для преобразованных (с уменьшением разрешения) исходных изображений, а затем для соседних пикселей, что позволяет достигнуть продолжительности синтеза, приемлемой для производства контента и кинопоказа.

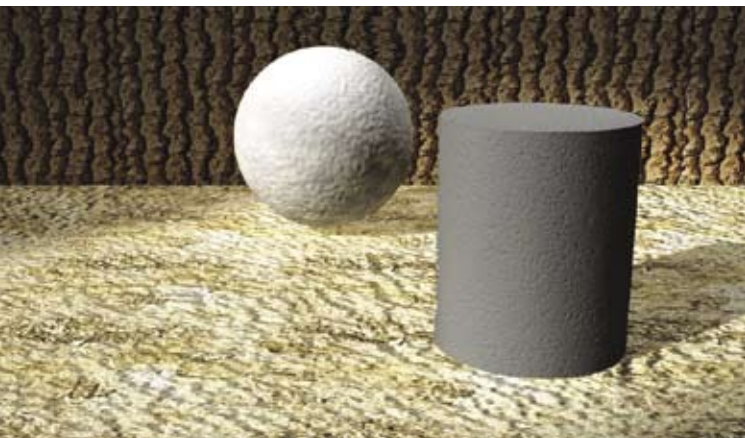
Полученные по новой программе образцы синтезированных изображений промежуточных ракурсов имеют практически тот же уровень качества, что и исходные изображения. Новая компьютерная программа открывает реальные возможности создания коммерческой системы стереоскопического цифрового безочкового многокурсового кинематографа, не имеющего многих существенных недостатков применяемых систем стереоскопического кинематографа.



Исходное изображение. Ракурс 000, разрешение 1080 строк



Ракурс 0.5, разрешение 1080 строк, модель на 540 строк



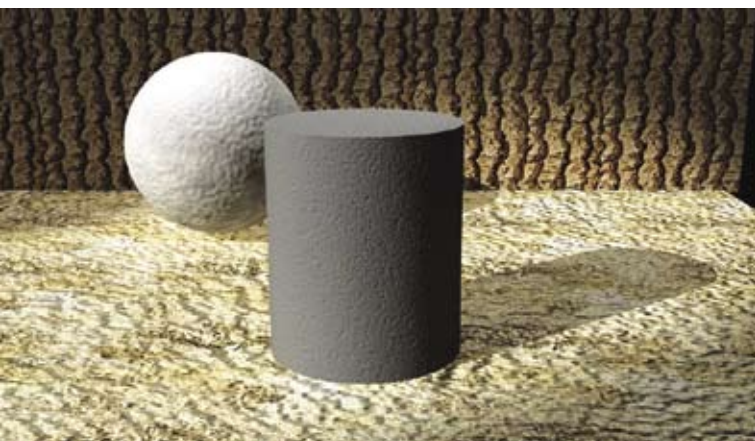
Ракурс 0.1, разрешение 1080 строк, модель на 540 строк



Ракурс 0.9, разрешение 1080 строк, модель на 540 строк

■ Интегральное стереокино, обеспечивающее объёмное изображение очень высокого качества без необходимости использования специальных очков, благодаря цифровым технологиям переживает сегодня своё второе рождение. Компания Philips с 2006 года серийно производит по сходной технологии целую линейку специальных «трёхмерных» мониторов, способных демонстрировать в разных ракурсах до 9 изображений одновременно. Благодаря своей относительной неприхотливости (существенной зоне, где достигается эффект объёмности и отсутствию специальных очков), они уже получили достаточно широкое распространение как средство демонстрации рекламы, и вероятно они станут одним из основных направлений развития трёхмерного кино и видео.

Однако широкому распространению и повсеместному внедрению данной технологии до сих пор препятствует проблема с формированием необходимого для неё специального контента. Существующие технологии позволяют создавать ролики для воспроизведения в подобных многокурсовых системах в полностью автоматическом режиме лишь из сцен, изначально доступных в виде цифровой трёхмерной модели, а также накладывать подобные компьютерные модели на «практически плоское» отснятое видео. Конвертация же «обычного» видеоматериала для получения приемлемого качества объёмного изображения сегодня требует серьёзного ручного вме-



Исходное изображение. Ракурс 100, разрешение 1080 строк

шательства. Расценки занимающейся подобного рода услугами компании Inition сегодня составляют от 2 до 5 тысяч долларов за каждую минуту обрабатываемого материала – и при этом качество получающихся объёмных изображений всё равно остаётся не идеальным. Одной из основных причин этого служит то, что базовый формат трёхмерного контента 2D+depth, продвигаемый сейчас компанией Philips, принципиально оставляет хорошо заметные артефакты слева и справа от существенно «выступающих вперёд» объектов. Усовершенствованная версия данного формата – Declipse лишена этого недостатка, но одновременно и намного более сложна в подготовке контента. Кроме того, на практике Declipse «работает» лишь там, где удаётся чётко разнести сцену на

объекты «переднего» и «дальнего» плана. Всё это сильно мешает интегральному стереокино выйти из своей узкой пока ещё ниши.

Возможно, уже в ближайшем будущем всё сильно изменится. В этой статье изложены итоги многолетней работы НИКФИ над созданием альтернативной, полностью автоматической компьютерной системы формирования контента кинематографического качества для интегрального стереокино из трёх видеопотоков, снятых единой камерой с тремя объективами.

Существующие методы реконструкции промежуточных изображений

На сегодняшний день практически общепринятым считается то, что не существует сколь-либо простого математического преобразования, которое позволяло бы по нескольким изображениям одного и того же объекта, снятого с разных ракурсов, получить качественное изображение того же объекта, как бы рассматриваемого с какого-нибудь третьего ракурса. Например, если мы попытаемся смешать пару изображений, наложив их друг поверх друга, то зритель увидит не какое-то промежуточное изображение, а просто «двоящуюся» картинку, в которой можно будет без труда угадать обе исходных. Двоение возникает при смешении частей изображений, относящихся к разным объектам. Можно избежать этого «двоения», если каждый пиксель промежуточного изображения будем брать либо строго из какого-то одного изображения, либо изображение будет смешиваться из пикселей, которые в разных картинках имеют примерно одинаковый цвет (например, соответствуют одной и той же реальной точке изображаемого трёхмерного объекта). Последний вариант становится гораздо правдоподобнее, если добавить сюда ещё одно соображение, что соседние пиксели в строимом промежуточном изображении должны браться из соседних же пикселей исходных изображений. Довольно очевидно, что это условие требует, чтобы по цвету были почти одинаковы не одиночные пиксели, а целые большие области – что автоматически выполняется для пар пикселей, выбранных по принципу соответствия одной и той же точке трёхмерного объекта, но весьма маловероятно для любого другого соответствия. Наконец, мы можем заметить, что большинство видимых точек на трёхмерном объекте при разумном выборе ракурсов исходных изображений отображается в пиксели в обоих исходных изображениях, причём эти пиксели, естественно, имеют одинаковый цвет. Следовательно, большая часть пикселей каждого из изображений может быть сопоставлена пикселям другого из изображений по принципу соответствия одной и той же реальной точке объекта, причём это соответствие – одно из очень немногих, которые удовлетворяют минимально необходимым условиям построения должного изображения того же объекта, рассматриваемого с промежуточного ракурса. Это естественным образом приводит нас к идее о том, что подобное сопоставление отдельных частей

исходных изображений друг другу является принципиально необходимым условием построения изображения промежуточного ракурса. Но к большому сожалению для инженеров, занимающихся созданием трёхмерного кинематографа, подобного рода сопоставление является одной из очень сложных и до конца не решённых современных задач компьютерного зрения.

Подавляющее большинство современных алгоритмов, используемых для реконструкции объёмных изображений по набору плоских, основываются на разбиении изображений по какому-нибудь принципу в конечный набор наиболее характерных его участков («фич», [1, 2, 4] с последующим установлением соответствия фич одного изображения фичам другого [6, 7]) и дальнейшей интерполяцией данного соответствия на всё изображение [5]. Подобный подход позволяет снизить размерность задачи и, соответственно, ускорить вычисления, а также снизить вероятность ошибочно сопоставить какие-то пиксели близких цветов, в действительности соответствующие разным точкам трёхмерного объекта. Некоторые из этих алгоритмов, сочетающие в себе поиск вначале небольшого количества наиболее характерных фич (которое возможно провести с очень высокой точностью), и определение по ним положения камер и мелкую детализацию с учётом этого положения, демонстрируют поистине впечатляющие результаты, вплоть до полноценной реконструкции трёхмерной сцены всего по нескольким фотографиям [8]. Однако значительного практического применения все эти технологии за последние пять лет так и не получили, несмотря на столь впечатляющий заявленный потенциал, что на наш взгляд свидетельствует о некоторой переоценке авторами их возможностей. Фактически решёнными можно считать лишь задачу определения положения движущейся камеры при съёмке видео (что бывает необходимо для «вклейки» в это видео несуществующих трёхмерных объектов), и, до какой-то степени, задачу реконструкции трёхмерного объекта по очень большой (несколько десятков и более) серии изображений – например, видеосъёмке одного объекта движущейся вокруг него камерой.

По счастью, методы, основанные на сопоставлении фич – далеко не единственное, что можно придумать для реконструкции промежуточных изображений. Можно заметить, что алгоритмы, основанные на «фичах», как бы идут от поиска соответствий в исходных плоских изображениях к построению объёмного изображения. Однако возможно пойти и обратным путём – попытаться вначале сконструировать объёмное изображение, посмотреть, насколько оно соответствует исходным плоским, и на основе этого сравнения подправлять созданную модель до тех пор, пока она не достигнет удовлетворительного качества. Однако известные нам подходы подобного рода [9, 10, 11] не имеют значительных преимуществ над методами, основанными на «фичах», и, соответственно, по тем же причинам сегодня не мо-



Исходное изображение. Ракурс 000, разрешение 1200 строк

гут использоваться в трёхмерном кинематографе. Для систем интегрального кино необходима стабильно работающая в разных условиях система, обеспечивающая кинематографическое качество получающихся изображений без видимых глазом артефактов, причём синтезирующая их из очень ограниченного числа исходных изображений (чтобы их можно было сравнительно легко отснять).

Предлагаемый метод также основан на построении должной модели объёмного изображения, но вместе с тем – несколько необычен, поскольку он реализует полный исчерпывающий перебор всех без исключения вариантов этой модели, с выбором из всего этого колоссального множества решения, которое наилучшим образом соответствует видимым изображениям. Он ранее никогда не использовался – пространство всех возможных вариантов настолько громадно и сложно устроено, что полный поиск подобного рода традиционно считался нереализуемым. В этом пространстве удалось найти определённую структуру, позволяющую (при минимальных ограничениях на используемые модели) ускорить данный поиск до хотя и значительного, но всё же приемлемого для практического использования времени. Наиболее близким аналогом, который удалось найти, является работа [12], использующая похожий подход с минимизацией; однако предлагаемая модель сложнее и, соответственно, работает в гораздо большем числе случаев.

Условия использования нового метода

Мы не стали пытаться ставить перед собой амбициозные задачи по реконструкции объёмных сцен по ограниченному числу изображений, снятых с произвольных ракурсов. Вместо этого мы попытались максимально упростить задачу, взглянув на неё сугубо с точки зрения производства и демонстрации контента в системах интегрального стереокино. В качестве источника данных нами была выбрана система из трёх одинаковых оптических цифровых каналов единой кинокамеры. Одного



Ракурс 0.5, разрешение 1200 строк, модель на 400 строк



Исходное изображение. Ракурс 100, разрешение 1200 строк



Ракурс 0.1, разрешение 1200 строк, модель на 400 строк



Ракурс 0.9, разрешение 1200 строк, модель на 400 строк

съёмочного канала камеры, очевидно, в принципе недостаточно для реконструкции объёмного изображения, а от традиционной системы из двух кинокамер (стерео) пришлось отказаться из-за того, что далеко не все пиксели в паре изображений возможно напрямую сопоставить друг другу. Последнее обстоятельство вынуждает нас каким-то образом выделять в стереопаре области, которые присутствуют на обоих изображениях, и области, которых в обоих изображениях нет («тени»), что в рамках нашей модели было возможно сделать лишь с помощью какой-нибудь эвристики – чего нам очень хотелось избежать. Система трёх кинокамер лишена этого недостатка – выбор теней в «правом» и «левом» изображениях в ней можно проконтролировать по третьему («референсному») изображению, взятому между ними (рис. 1). Очевидный минус подобного подхода – то, что подобные системы никогда ранее не использовались и старые стереоархивы не могут быть обработаны нашим алгоритмом. Однако с технической точки зрения система с кинокамерой с тремя объективами (или состоящая из трёх кинокамер) всё же очень близка к стереокамерам, а потому не вызывает особых сомнений, что киностудии,

использующие сегодня стереосъёмку, смогут без труда перейти на новую систему*.

Для выбранной нами трёхобъективной съёмочной аппаратуры необходимо, чтобы оптические оси всех трёх объективов были строго взаимно параллельны и лежали в одной плоскости. Требуется, чтобы их фокальные плоскости совпадали и камеры не были бы смещены вокруг своих оптических осей друг относительно друга. Иными словами, в съёмочной установке три одинаковых съёмочных канала размещаются в один ряд параллельно друг другу. Подобное размещение трёх кинокамер не представляет никаких практических проблем для съёмки и в то же время позволяет упростить задачу сравнения получаемых с них изображений, т.к. в подобной системе изображения одной и той же точки в пространстве создаются объективами на одной и той же «высоте» над нижней границей кадра. Это позволяет отказаться

*Для сравнения можно вспомнить, что не цифровые реализации систем интегрального стереокино требовали несопоставимо более громоздких, дорогих и неудобных кинокамер или основывались на практически неприемлемых для производства технологиях.

от сравнения между собой целых изображений в пользу сравнения соответствующих строк в изображениях. Данный принцип является фундаментально важным для нашего алгоритма, но вместе с тем накладывает новые ограничения на нашу систему – подобного рода построчное соответствие должно быть очень точным. Расхождения положения точки в разных изображениях даже на несколько строк у нас уже может привести к образованию артефактов в некоторых сценах. Формально это накладывает очень высокие требования на точность взаимного расположения камер и отсутствие дисторсии у объективов – но, к счастью, небольшие погрешности подобного рода могут быть легко исправлены при помощи цифровой коррекции изображений. Поэтому на практике достаточно, чтобы объективы и светочувствительные матрицы камеры были просто максимально жёстко закреплены друг относительно друга, а объективы обладали «простой» (легко корректируемой) установочной фокусировкой, коррекцией дисторсией – чего уже добиться несложно. Результатом работы алгоритма становится довольно компактный набор инструкций для специальной программы, позволяющей построить из правого и левого изображения изображение любого промежуточного ракурса, соответствующее тому, что увидела бы гипотетическая четвёртая камера, будучи помещённой в выбранном месте между левой и правой кинокамерами. Эта виртуальная камера предполагается обладающей ровно такими же параметрами, как и реальные камеры, использованные при съёмке, и размещается с соблюдением тех же ограничений на её положение. Ракурсом данной камеры считается относительное расстояние от неё до условной левой камеры (точнее левого съёмочного канала) и по сравнению с расстоянием между правой и левой камерой – т.е. ракурс 0 соответствует левой камере, ракурс 1 – правой, а ракурс 0.5 – камере, размещённой ровно посередине между правой и левой камерой. Посмотреть на изображаемый объект «сверху», под другим углом, с другого расстояния, используя наш алгоритм, невозможно. Может показаться, что это является существенной проблемой нашего метода, но на самом деле эти ограничения присущи и систе-

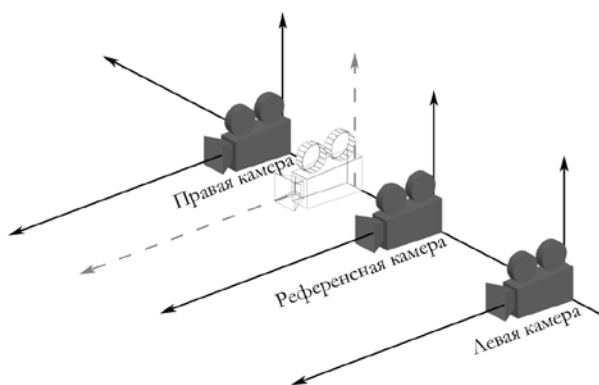


Рис. 1. Расположение камер при съёмке и понятие о промежуточных ракурсах

ме интегрального стереокино в целом – а наша схема с несколькими параллельными камерами просто моделирует принятую там систему воспроизведения контента. Получаемый при этом зрительный эффект объёмности (несмотря на все описанные недостатки) всё равно остаётся одним из лучших, если не лучшим среди известных методов воспроизведения объёмного контента.

Принцип работы нового метода

Как уже было сказано, основные особенности предлагаемого метода – это:

1. построчное сравнение изображений;
2. перебор всех возможных соответствий (в рамках определённой модели) одного изображения другому с выбором среди них глобально наилучшего.

Первый пункт в этом списке кажется невероятным – объём информации, содержащийся в информации о яркости и цвете всего лишь одной строки (пусть и в трёх изображениях), кажется настолько малым, что ошибки в сопоставлении разных изображений выглядят неизбежными. Однако на практике результат в подавляющем большинстве случаев получается безукоризненным – все приводимые в данной статье демонстрационные изображения были построены на основе независимого сравнения строк в изображениях. Всё основывается на том, что при использовании правильной модели соответствия левого исходного изображения правому (совпадающей с тем, что в сцене есть в действительности), синтезированное по этой модели изображение для ракурса референсной камеры в точности совпадёт с тем, что референсная камера видит в действительности, в то время как любая неверная модель соответствия даст изображение хотя бы чуточку худшего качества. А поскольку перебираются все без исключения модели – то неважно, сколь велико число «ошибочных» соответствий: правильное среди них – всё равно лучшее, и выбрано будет именно оно. На рис. 2 показан пример подобного соответствия (строка взята из демонстрационного изображения с цилиндром и шаром в районе, где они перекрываются; белая строка – референсное изображение).



Рис. 2. Пример построенного соответствия двух строк

Перебираемые модели достаточно просты:

1. Для каждого пикселя в изображении выбирается «эквивалентный» (который имеет прямое соответствие в другом изображении) или «теневой» (не имеет прямого соответствия, т.к. перекрывается каким-то более близко расположенным объектом).

2. Для всех эквивалентных пикселей указывается соответствующий им пиксель в противоположном изображении.

3. Если в одном изображении эквивалентный пиксель А находится левее эквивалентного пикселя Б, то и в противоположном изображении пиксель, соответствующий А, должен находиться левее пикселя, соответствующего Б (запрет на «пересечения» эквивалентных пикселей в промежуточных изображениях).

4. Эквивалентные пиксели, обрамляющие участки строк, целиком состоящие из теневых пикселей, должны в одном из изображений (левом или правом) быть соседними пикселями в строке. Если тень обрамлена лишь одним эквивалентным пикселем (находится на краю изображения), то этот пиксель должен в одном из изображений также быть крайним.

Изображение промежуточного ракурса по такой модели строится без особого труда. Вначале определяется положение эквивалентных пикселей. Если L – координата эквивалентного пикселя в левом изображении, R – координата соответствующего ему эквивалентного изображения в правом, а α – выбранный ракурс промежуточного изображения, то наш эквивалентный пиксель в это промежуточное изображение мы поместим в координату $L + \alpha(R - L)$. Цвет этого пикселя можно брать из любого изображения – левого или правого: это не очень принципиально, т.к. предполагается, что в идеальной модели они всё равно должны совпадать. На практике мы использовали взвешенную сумму цветов пикселя в левом и правом изображениях, используя в качестве весов соответственно α и $(1 - \alpha)$. Оставшиеся незаполненными «теневые» участки копируются «куском» из левого или из правого изображения параллельно одному из обрамляющих данный теневой участок эквивалентных пикселей по правилу, изображенному на рис. 3. Благодаря отсутствию самопересечений у эквивалентных пикселей промежуточное изображение строится прямолинейно и просто. Рис. 4 наглядно иллюстрирует, почему эта модель работает.

Можно отметить, что предлагаемая модель формально не позволяет задавать наклонные поверхности, видимая «ширина» которых при переходе от левого ракурса к правому изменяется. В нашей модели эта поверхность должна будет состоять из эквивалентных пикселей, «ширина» которых, естественно, не меняется в левом и правом изображениях и которые не могут даже пересекаться друг с другом. Но на практике это ограничение с минимальными погрешностями обходится путём замены чисто эквивалентной модели на модель слегка «разбавленную» отдельными теневыми пикселями, исчезающими в процессе перехода от одного крайнего ракурса к другому (рис. 5). Точно так же реализуются в общем случае и сложные криволинейные поверхности.

Несколько сложнее обстоят дела со случаями, где очень близко к камерам находится какой-нибудь небольшой объект, так, что при формальном определении эквивалентных пикселей как точек объектов, видимых всеми камерами одновременно, потребовалось бы задать их таким образом, что где-то в изображениях промежуточных ракурсов они бы пересекались. Рис. 6 иллюстрирует, как

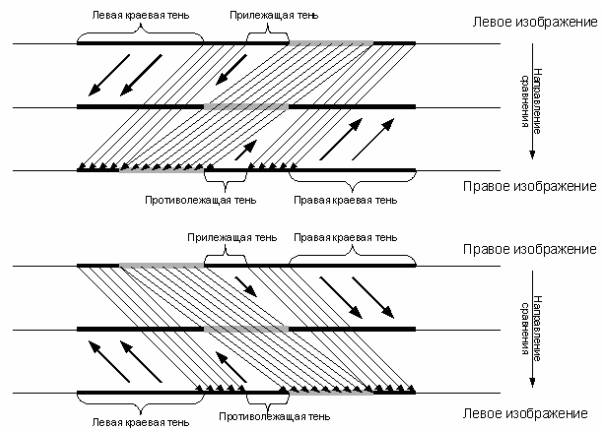


Рис. 3. Направление заполнения теней в изображении промежуточного ракурса

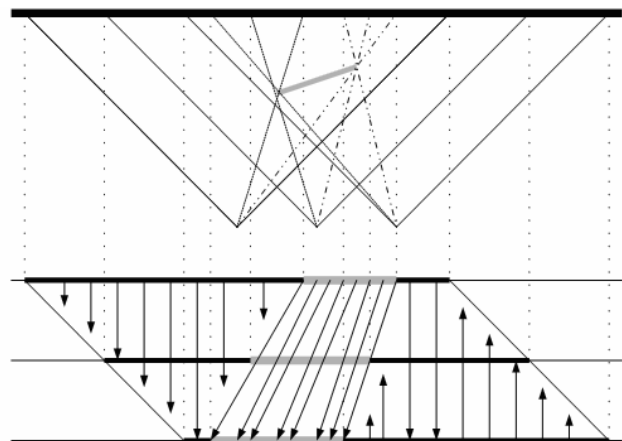


Рис. 4. Модель построения изображений промежуточного ракурса, пояснённая на примере формирования реального изображения видимого камерой промежуточного ракурса

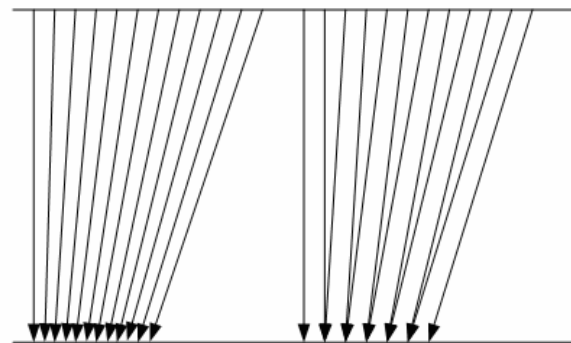


Рис. 5. «Честное» масштабирование участка строки и масштабирование, доступное в рамках предлагаемой модели

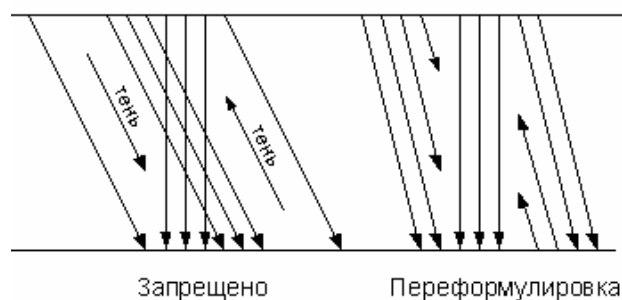


Рис. 6. Переопределение самопересекающихся эквивалентных пикселей на тени

эта проблема может быть решена путём переопределения части эквивалентных пикселей как теневых. Можно проверить, что модель, полученная в подобном подходе, даёт точно такое же изображение в промежуточных ракурсах как и корректная, если задний план за объектом является достаточно плоским.

Последняя ситуация, когда наша модель может работать неправильно – это когда в промежуточных изображениях присутствуют области, не существующие ни на одном из исходных изображений. Примером может служить изображение далёкого объекта, видимое в узкую щель между двумя рядом стоящими объектами переднего плана – зачастую на «среднем» плане при этом будут видны детали, которых не было ни в левом, ни в правом исходных изображениях. Другая разновидность этой же проблемы – это когда одна и та же точка объекта в разных изображениях выглядит по-разному из-за зеркальной компоненты в отражении света. Невозможно реализовать и полупрозрачные или преломляющие свет объекты.

Если подытожить всё вышесказанное, то получится, что наша модель неприменима в ситуациях, описанных в таблице 1**. Соответственно во всех сценах подобного рода возможно появление тех или иных артефактов в указанных местах. Мы не считаем это серьёзной проблемой, поскольку встречаются подобные ситуации довольно редко, а возникающие артефакты, если только ситуация не акцентируется оператором специально, – локализованы и довольно малозаметны; вдобавок описанные ситуации представляют серьёзные проблемы и для большинства альтернативных методов трёхмерной реконструкции.

В свою очередь, несмотря на указанные ограничения, предложенная модель очень удобна для эффективного перебора всех возможных вариантов соответствия строк. Обычно подобного рода перебор невозможен потому, что даже для крошечных изображений, насчитывающих всего по 100 пикселей в каждой строке, и ограниченном числе вариантов выбора соответствия для каждого пикселя (ска-

жем, 10), полное число возможных вариантов соответствия составляет 10^{100} вариантов, перебрать которые невозможно даже за миллионы лет работы всех существующих сегодня компьютеров в мире. Но выбранная нами модель позволяет очень эффективно «отсекать» огромные куски этого пространства до тех пор, пока не останется единственный оптимальный вариант. Идея здесь состоит в том, что если взять любой из эквивалентных пикселей E в изображении, то за счёт запрета на самопересечения окажется, что модели слева и справа от этого пикселя строятся совершенно независимо друг от друга, формируют независимые же участки в изображении – а потому и могут рассматриваться независимо. Естественно, что для этих «левой» и «правой» половинок существуют свои оптимальные решения, определяющиеся лишь выбором E , – их можно обозначить, скажем, $L(E)$ и $R(E)$. При этом нетрудно показать, что и $L(E)$ и $R(E)$ легко и эффективно строятся по индукции. Представим себе, что мы рассматриваем левое изображение и для всех E , которые имеют в левом изображении координату $x(E) \leq x_0$, $L(E)$ нам уже известны. Рассмотрим теперь любой эквивалентный пиксель E_1 который в левом изображении имеет координату $x(E_1) = x_0 + 1$. Для любого решения X , области, ограниченной справа E_1 , посмотрим на ближайший к E_1 эквивалентный пиксель в левом изображении и обозначим его как $E(X)$. Оптимальное решение для области, расположенной левее $E(X)$, по предположению индукции нам уже известно – это $L(E(X))$, следовательно, под вопросом остаётся лишь область изображения, оказавшаяся зажатой между $E(X)$ и E_1 и, согласно нашему выбору, состоящая лишь из теневых пикселей. А это в нашей модели может быть только тень, причём определяющаяся однозначным образом. Для вычисления $L(E_1)$ остаётся лишь перебрать все возможные $E(X)$, которых сравнительно немного, и выбрать среди них такое, при котором получающееся решение для X оптимально. Подобным образом, начав с крайних пикселей в каждом изображении и постепенно продвигаясь к проти-

Таблица 1. Применимость использованной модели

Степень расхождения модели и реального изображения	Существенно наклонённые к камере поверхности объектов	Маленькие объекты, сильно выдвинутые к камере по сравнению с объектами находящимися за ними	В изображениях промежуточного ракурса есть области, невидимые ни на левом, ни на правом изображениях	Объекты обладают выраженной зеркальной компонентой в отражении света	Полупрозрачные и преломляющие свет объекты
Незаметное	Наклонная поверхность слабо текстурирована	Фон за объектом не наклонен к камере		Плоские зеркала, блики и отражения на ненаклоненных поверхностях	
Заметное	Наклонная поверхность сильно текстурирована	Фон за объектом наклонен по отношению к камере	Объект заднего плана мало отличается по цвету от объекта переднего плана	Небольшие или слабо выраженные блики	Полупрозрачный объект большой и в основном однотонный, либо он находится на заднем плане
Сильное	Наклонная поверхность сильно текстурирована и вдобавок не видна в одном из изображений	Фон состоит из множества объектов на разных расстояниях, либо сильно наклонен	Объект заднего плана сильно отличается по цвету от объекта переднего плана	Сильные, крупные блики на сильно искривленных поверхностях	Линзы, неплоские стекла, криволинейные зеркала, сложный полупрозрачный объект на переднем плане

**Под «наклоном» в таблице везде понимается угол между сечением поверхности горизонтальной плоскостью и перпендикуляром к прямой, проведённой в сторону расположения съёмочной установки. К примеру, горизонтальный пол в помещении не считается наклоненным к камере, а вот вертикальные стены слева и справа от камеры – заметно наклонены.

воположной стороне, можно без труда за полиномиальное время построить $L(E)$ и $R(E)$ для всего изображения. После этого останется лишь выбрать такое E , для которого склеенное из двух половинок $L(E)+R(E)$ решение даёт наилучшие результаты – это и будет глобально наилучшей моделью среди всех возможных. Пример графика $err(E)$, оценивающего решения $L(E)+R(E)$, приведён на рис. 7. Можно заметить, что он напоминает график преобразования Хафа [7], широко используемого для распознавания образов в системах компьютерного зрения, и, при более детальном рассмотрении, может считаться его дальним родственником. Данный график может использоваться на практике как определённая модель вероятной «глубины» изображения, а также (как уже было замечено ранее), для более общей задачи поиска оптимальной модели при условии, что один эквивалентный пиксель в ней уже известен (что может быть использовано в случаях, где нужно различить два очень похожих решения).

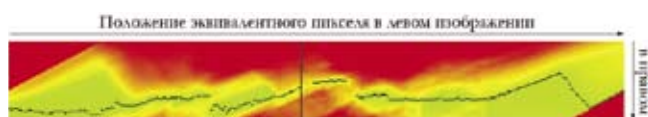


Рис. 7. График вычисленной функции $err(E)$

Мы умышленно ничего не сказали про то, как проверяется «качество» полученного нами решения. Это – открытая тема для исследований: здесь можно проверять и совпадение наиболее характерных точек, посчитанных каким-то другим путём, и приблизительную карту глубины (скажем, усреднённую по результатам данных, полученных на первом проходе, или полученную в предыдущем кадре видеопоследовательности, или просто набросанную вручную), и задавать разнообразные условия на то, где можно создавать тени, а где нет. Предлагаемое нами математическое преобразование ограничивает выбор оценки лишь необходимостью того, чтобы $L(E)$ и $R(E)$ могли бы быть оценены по отдельности друг от друга. В расчётах мы использовали наиболее примитивную среди всех возможных оценку – вычисляли среднеквадратичное отклонение построенного нами изображения промежуточного ракурса от реально наблюдаемого, прибавляли к нему среднеквадратичное отклонение цветов в левом и правом изображениях для эквивалентных пикселей. Нет никаких сомнений в том, что в дальнейшем это может быть улучшено, в том числе и за счёт учёта «взаимного влияния» соседних строк друг на друга.

Полученные результаты и перспективы развития

Был разработан удобный программный комплекс, вычисляющий предложенное нами преобразование на практике. Полученные на нём результаты приведены в качестве иллюстраций в этой статье. Из этих иллюстраций видно, что уровень качества синтезированных по данной программе изображений (ракурсы 0,1; 0,5; 0,9) практически такой же, как уровень качества левого и

правого исходных изображений (ракурсы 000, 100). Использовалось лишь сугубо построчное сравнение с простой проверкой качества получающегося результата, т.е. были задействованы далеко не все возможности нового преобразования.

Наиболее существенный выявленный недостаток – это высокая вычислительная сложность предложенного алгоритма. Несмотря на то, что по меркам пространства, в котором ведётся поиск, этот поиск очень «быстр», он всё же требует вычисления для изображения w на h пикселей громоздкой трёхмерной таблицы в $w \cdot h \cdot L$ элементов, где L – число вариантов соответствия, проверяемого для каждого пикселя, обычно пропорциональное w . Кроме того, при вычислении каждого элемента данной таблицы проводится оценка L возможных вариантов, и на вычисление оценки «качества» каждого варианта требуется ещё какое-то дополнительное время X , обычно также пропорциональное w . В итоге получается, что общее время вычислений составляет $w \cdot h \cdot L^2 \cdot X$ и (с учётом того, что w пропорционально h), в целом пропорционально h^5 . Таким образом, увеличение разрешения изображения вдвое приводит к увеличению времени расчёта преобразования в 32 раза, а увеличение разрешения вчетверо – к тысячекратному (!) росту временных затрат. В итоге, в зависимости от выбранного разрешения сравниваемых изображений, время расчёта может быть делом как нескольких секунд, так и нескольких дней. К счастью, задача замечательно распараллеливается, а потому для изображений с числом строк порядка 400–600 время расчёта составляет порядка одного часа на каждый кадр для современной рабочей станции с четырёхядерным процессором, что вполне приемлемо для задач конвертации в трёхмерный формат фильмов и видеороликов стандартного разрешения на вычислительных кластерах. Но вот фильмы более актуальных сегодня HD-форматов с числом строк от 1000 и более «напрямую» подобным образом рассчитать, увы, невозможно.

Чтобы обойти это ограничение, мы использовали метод проведения расчётов нашего преобразования по изображениям уменьшенного разрешения и последующим масштабированием полученных результатов на изображения полного разрешения. Это дало очень хорошие результаты, вполне пригодные для практического решения (приводимые в статье картинки рассчитывались с коэффициентом уменьшения разрешения для расчётов в 2–3 раза, как по числу строк, так и по числу пикселей в строке). Возможно, в будущем появятся и другие решения данной проблемы.

Интересно отметить, что с другой стороны, полиномиальная зависимость времени расчётов от разрешения изображения может быть использована и в «обратную» сторону – для изображений с числом строк порядка 100–200 предлагаемое преобразование при условии специализированной аппаратной поддержки может вычисляться в реальном масштабе времени. Это разрешение, конечно, слишком мало, чтобы различать многие детали,

поэтому вероятность появления артефактов там будет выше, но для не очень требовательных задач типа видеоконференций или любительских видеороликов такой подход может быть вполне оправдан.

Второй по степени серьезности проблемой стала высокая требовательность алгоритма к качеству исходных изображений. Наш метод, как уже было сказано, основан на идее о том, что правильная модель должна давать изображение промежуточного ракурса, идеально согласующееся с тем, которое наблюдается в действительности. На практике же из-за небольших погрешностей в исходных изображениях этого идеала бывает трудно достичь, и правильный вариант тоже начинает отличаться от наблюдаемого изображения, что сильно уменьшает разницу между ним и «ошибочными» решениями, повышая вероятность того, что найдено будет именно ошибочное решение. Например, для использованной нами функции сравнения на основе вычисления среднеквадратичной разности между синтезированным изображением и построенным, заметны были даже артефакты сильной JPEG-компрессии, и изображения с разных камер, у которых немного отличалась экспозиция. Дисторсия, неодинаковая резкость по всему полю кадра, виньетирование – всё это тоже может создавать проблемы. Неидеальное построчное выравнивание и непараллельность оптических осей камеры создают ещё больше трудностей. Возникающие при этом артефакты почти незаметны, но они всё же есть, и с ними приходится бороться предварительной обработкой вход-

ных изображений с доведением их до нужных стандартов качества и сравнительно высокими требованиями к осуществляющим запись кинокамерам. Другим возможным решением данной проблемы может являться увеличение числа референсных кинокамер.

Удачно оказалась решена проблема хранения просчитанного объёмного изображения. Хотя время расчёта нашего специального преобразования и велико, конечным его итогом является компактный набор легко параметризуемых моделей для каждой из строк, причём для синтеза итогового изображения промежуточного ракурса достаточно этой информации и двух исходных изображений, использовавшихся при съёмке (левого и правого). Это вплотную приближает нас к хранению обычного стереопотока с лишь небольшим количеством дополнительной информации (менее 140 Кб на пару изображений), что может быть очень удобно.

В ближайшее время мы планируем создание опытной системы, которая использовала бы предлагаемое преобразование на практике (рис. 8), и съёмку с использованием нескольких демонстрационных фильмов. Мы рассчитываем, что предложенная технология уже скоро найдёт широкое применение в системах коммерческого трёхмерного кино и телевидения. Кроме того, она обладает действительно большим заделом для дальнейшего развития и адаптации – предлагаемое нами преобразование пока ещё очень слабо изучено, так что, вероятно, полученные нами результаты можно будет значительно улучшить. ■

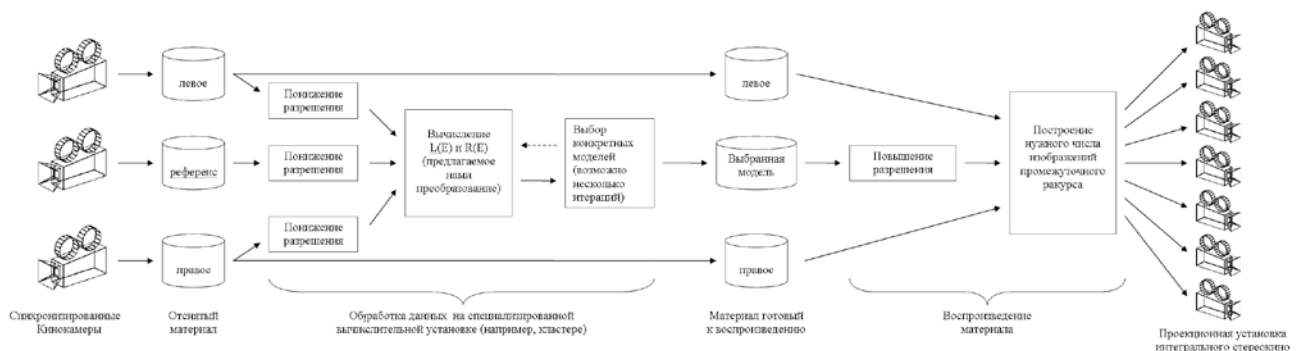
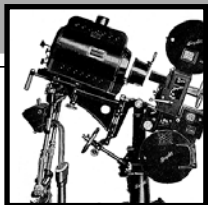


Рис. 8. Общая схема системы, использующей предлагаемый метод

ЛИТЕРАТУРА

1. Lowe David G. Object recognition from local scale-invariant features. Proceedings of the International Conference on Computer Vision 2. 1999. P. 1150–1157.
2. Canny J. F. A computational approach to edge detection. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1986. P. 679–698.
3. Harris C. and Stephens M. A combined corner and edge detector. Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference. 1988. P. 147–151.
4. Matas J., Chum O., Urban M. and Pajdla T. Robust wide baseline stereo from maximally stable extremum regions. British Machine Vision Conference. 2002. P. 384–393.
5. Longuet-Higgins Christopher H. A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections. Nature # 293. 1981. P. 133–135.
6. Beis J., Lowe David G. Shape indexing using approximate nearest-neighbour search in high-dimensional spaces. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Puerto Rico. 1997. P. 1000–1006.
7. Ballard D.H. Generalizing the Hough Transform to Detect Arbitrary Shapes, Pattern Recognition. 1981. Vol. 13, No. 2. P. 111–122.
8. Strecha C., Tuytelaars T., Van Gool L. Dense Matching of Multiple Wide-baseline Views. Proceedings of the International Conference on Computer Vision 9: Proceedings of the International Conference on Computer Vision 2, vol. 2. 2003. P. 1150–1157.
9. Kutulakos K. and Seitz S. A theory of shape by space carving. International Journal of Computer Vision, vol. 38(3). 2000. P. 197–216.
10. Slabaugh G., Schafer R. and Hans M. Image-based photo hulls. 1st Int. Symp. of 3D Data Processing Visualization and Transmission. 2002. P. 704–707.
11. Faugeras O. and Keriven R. Complete dense stereovision using level set methods. Proc. ECCV. 1998. P. 379–393.
12. Lukyanitsa A. Effective Algorithm for Reconstruction of Intermediate Views from Stereopair. Graphicon 2006 Conference Proceedings.



ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ЛИТОГРАФ

для изготовления фотошаблонов, используемых при производстве широкоформатных дисплеев

А.С. Гончаров, студент 6-го курса МГТУ им. Н.Э. Баумана

Введение

Развитие современной микро- и нанооптоэлектроники сопровождается необходимостью уменьшения характеристического размера изготавливаемых устройств, в том числе: интегральных микросхем, жидкокристаллических и плазменных панелей и т.д. До настоящего времени эта потребность обеспечивалась, в основном, за счёт уменьшения рабочей длины волны фотолитографических устройств. Причём с уменьшением длины волны используемого излучения и, следовательно, с уменьшением характеристического размера отображаемых структур наблюдается устойчивая тенденция к уменьшению безаберрационного участка поля проекционных объективов.

Системы современной фотолитографии

Современная фотолитография разделилась на две параллельные ветви. Одна из них нацелена на достижение предельно малых характеристических размеров и предназначается, в первую очередь, для микропроцессоров и систем памяти. Вторая ветвь нацелена на производство дисплеев большой площади и по предъявляемым к ней требованиям существенно отличается от первой ветви. Дело в том, что современные тенденции развития дисплеев направлены не столько на уменьшение размера единичного пикселя изображения, сколько на увеличение общей площади устройств. В этой ситуации особо актуальной становится задача разработки методов высокоразрешающей проекционной фотолитографии, обеспечивающих одномоментное экспонирование относительно большого участка заготовки дисплея. Традиционный метод проекционной фотолитографии, основанный на использовании дорогостоящих проекционных объективов, обладает существенными ограничениями по площади одновременно экспонируемого участка фоторезиста, обусловленными невозможностью полной коррекции полевых аберраций. Поэтому возникает необходимость его замены альтернативными методами. Наиболее перспективным представляется метод голографической

фотолитографии, характеризующийся возможностью формирования полностью свободного от аберраций, в том числе и полевых, действительного изображения зарегистрированного объекта.

Известны ультрафиолетовые фотолитографы с ламповыми источниками излучения [1]. Такие УФЛ-ЛИ имеют ограничения по разрешению (в пределах 2–3,5 мкм) и в основном предназначены для изготовления пластин-подложек с микроэлектронной структурой для крупноформатных ЖК-экранов.

Изобретения [2, 3] описывают ультрафиолетовые лазерные фотолитографы (УФЛЛ). Такие УФЛЛ предназначены для изготовления пластин с микроэлектронной структурой для микросхем-чипов с максимально возможным разрешением и поэтому в них используются эксимерные лазеры с максимально коротким УФ-излучением. Использование УФ-излучения эксимерных лазеров позволяет достигнуть минимального элемента разрешения до уровня 0,045 мкм [4] (при экспонировании кремниевых пластин с фоторезистом; причём число транзисторов на 1 см² достигает 180 миллионов [5–7]). Такую технологию, позволяющую получить минимальные размеры элементов на чипе до 45 нм, называют «45-технология»; она может быть использована для получения не только фотошаблонов, но и для получения дифракционных оптических элементов (ДОЭ) и голограммных оптических элементов (ГОЭ). В перспективе на этих принципах возможно создание «32-технологии».

Голографические методы в фотолитографии

Одним из перспективных направлений развития голографической литографии является создание ультрафиолетового лазерного литографа с голограммным оптическим компонентом (УФЛЛ-ГОК) [8–10]. В основном УФЛЛ-ГОК предназначены для изготовления пластин-подложек с микроэлектронной структурой для крупноформатных ЖК-экранов. При использовании такого литографа возможно получение элемента разрешения 0,3–0,5 мкм [8].

При этом установка УФЛЛ-ГОК состоит из двух подсистем:

- подсистема записи изображений фотошаблонов на ГОК путём экспонирования на фоточувствительную голографическую регистрирующую среду в ультрафиолетовом лазерном излучении;
- подсистема восстановления изображений фотошаблонов с ГОК и их записи на кремниевые пластины с фоторезистом; при этом ГОК («голограмма-проектор») является формирователем микроизображений в плоскости регистрации.

Известны также так называемые бесшаблонные лазерные фотолитографы (БШЛЛ), в основе работы которых лежит интерферометрическая литография [11,12]. Такие БШЛЛ предназначены для изготовления одномерных и двумерных решётчатых структур: дифракционных решёток, матриц отверстий или конусов, мезаструктур, микролинз. Это достигается за счёт использования трёх или четырёх пучков лазерного излучения. Минимальный размер разрешаемого элемента, получаемого при использовании такого литографа, – 0,09–0,15 мкм, а минимальный шаг решётчатой структуры – 0,193–0,260 мкм [12].

УФЛЛ-ГОК нашли применение в технологии производства жидкокристаллических дисплеев большой площади. В этом случае ставится задача не столько на получение минимально достижимого размера единичного пикселя изображения, сколько на одномоментное экспонирование больших участков площади на заготовках пластин-подложек ЖК-дисплеев.

Основными достоинствами установок УФЛЛ-ГОК по сравнению с УФЛЛ являются:

- возможность формирования увеличенного размера изображения фотошаблонов, восстановленного с ГОК, и его одномоментное экспонирование на кремниевые пластины с фоторезистом;
- повышение производительности технологии производства крупноформатных жидкокристаллических дисплеев за счёт формирования увеличенных площадей;
- уменьшение влияния эффекта экранирования микрочастицами пыли элементов разрешения при экспонировании изображений фотошаблонов в силу информационной избыточности голограммного оптического компонента, который восстанавливает полное изображение даже при наличии частиц пыли на его поверхности;
- снижение энергопотребления и стоимости установки в силу использования более простого в эксплуатации и более дешёвого ионного аргонового лазера, а также исключения сложного и дорогостоящего проекционного объектива в подсистеме восстановления изображений фотошаблонов с ГОК и их экспонирования на кремниевые пластины с фоторезистом.

Важнейшим моментом при разработке и создании УФЛЛ-ГОК является выбор голографической регистрирующей среды для записи ГОК. В настоящее время наиболее перспективными регистрирующими средами для ГОК являются:

- халькогенидные стеклообразные полупроводниковые (ХСП) материалы;
- фотополимерные (ФП) материалы.

Основным достоинством ХСП и ФП материалов является возможность постобработки без «мокрого процесса» (в отличие от галогенидосеребряных фотоматериалов) и значительно меньшая усадка в ГОК, что принципиально важно для фотолитографического процесса. Решение об использовании ХСП или ФП материалов принимается в каждом конкретном случае под соответствующий фотолитографический процесс.

Тенденции развития современных ФП материалов показывают, что фотополимерные материалы находят всё большее применение и имеют целый ряд достоинств по сравнению с ХСП материалами (например, возможность записи трёхмерных голограмм в объёме материала). Создание современных ФП материалов с требуемыми параметрами и характеристиками в сильной степени было стимулировано стремительным развитием систем голографической памяти. Поэтому в настоящее время большинство разработчиков ориентируются на получение ГОК на основе ФП материалов.

Оптико-электронный голографический литограф: принцип действия и отличительные особенности

Оптико-электронный голографический литограф, разработанный на основе фотополимерной голограммной пластины (ОЭГЛ-ФГП), обеспечивает:

- возможность динамического формирования и смены фотошаблонов в реальном масштабе времени за счёт использования пространственного модулятора света (ПМС);
- увеличение производительности получения фотошаблонов от нескольких секунд (при минимально разрешаемом элементе 3,5 мкм и размерах шаблона 127x127 мм) и до единиц минут (при минимально разрешаемом элементе 0,5 мкм и размерах шаблона до 127x127 мм), что до 100 раз быстрее, чем в электронно-лучевой литографии;
- возможность создания фотошаблонов не только на поверхностях подложек плоской формы, но и на поверхностях подложек сферической формы, изготовленных как из оптических, так и неоптических материалов;
- уменьшение габаритов, массы, энергопотребления и стоимости подсистемы восстановления изображений фотошаблонов с ГОК.

Таким образом, теперь нет необходимости изготавливать материальный носитель (фотошаблон) с входным изображением, поскольку изображение формируется компьютером. Наряду с экономической выгодой, это обеспечивает универсальность и гибкость при практическом использовании ОЭГЛ с ФГП. Проекционный объектив в подсистеме записи ФГП формирует изображение со значительным уменьшением относительно пространственного модулятора света, что позволяет легко изменять и повышать разрешающую способность изображения в формируемых фо-

тошаблонах. Разработанная схема позволяет применять для опорного и предметного пучков геометрическую форму типа «щель», перекрывая всю ширину изображения.

Таким образом, созданная схема позволяет устранить выявленные недостатки стандартной схемы голографического литографа, повысить производительность процессов записи и восстановления и снизить себестоимость работ на голографическом литографе. Возможность уменьшения восстановленного изображения относительно исходного, задаваемого ПМС, проекционным объективом степпера и дополнительным объективом, позволяет перейти к нанолитографии.

В результате была предложена оптическая схема, реализующая описанные выше преимущества. Оптическая схема подсистемы перезаписи изображений фотошаблонов на ФГП оптико-электронного голографического литографа показана на рис. 1. В качестве источника излучения использовался гелий-кадмиевый (He-Cd) лазер.

Подсистема работает следующим образом: излучение лазера после прохождения через затвор и отражения от зеркала 1 попадает на светоделительный куб 2, где разделяется светоделительным кубом на предметную и опорную волны.

Излучение предметной волны после отражения от зеркала 1 попадает в оптическую систему расширения и коллимации лазерного излучения, состоящую из узла фильтрации оптического излучения 3 и двухкомпонентного объектива 4 и 5, где происходит расширение лазерного пучка до требуемого размера. С помощью репродукционного объектива 7 изображение фотошаблона, формируемое на пространственном модуляторе света 6, переносится

с увеличением 0,0055 на пластинку с фотополимерным материалом. Излучение опорной волны после светоделительного куба отражается от зеркала и попадает на пластинку с фотополимерным материалом. При взаимодействии предметной и опорной волн получается голограмма.

Для восстановления изображения фотошаблонов с ФГП с последующей регистрацией их на фоторезист была разработана оптическая схема, представленная на рис. 2.

Здесь излучение от He-Cd лазера проходит через затвор, обеспечивающий требуемые времена экспонирования. При помощи системы зеркал 1 излучение направляется на ФГП 3. Диаметр восстанавливающего пучка формируется при помощи диафрагмы 2, установленной между последним зеркалом и ФГП. Ранее записанное на ФГП изображение при такой подсветке восстанавливается в непосредственной близости от поверхности фотополимера. Для переноса восстановленного изображения с поверхности фотополимера в плоскость чувствительной площадки приёмника излучения применяется специально рассчитанный проекционный объектив 4 с кратностью $\frac{1}{4}$. В плоскости чувствительной площадки приёмника излучения установлена пластинка с фоторезистом.

Метод изготовления фотошаблона заключается в следующем:

1. На пластинке с фоторезистом проводится многократное экспонирование изображений фотошаблонов, восстановленных с ФГП.

2. ФГП и пластинка с фоторезистом перемещаются в соответствии с заданным законом при экспонировании; для этого они должны быть установлены на прецизионные устройства двухкоординатного перемещения, каж-

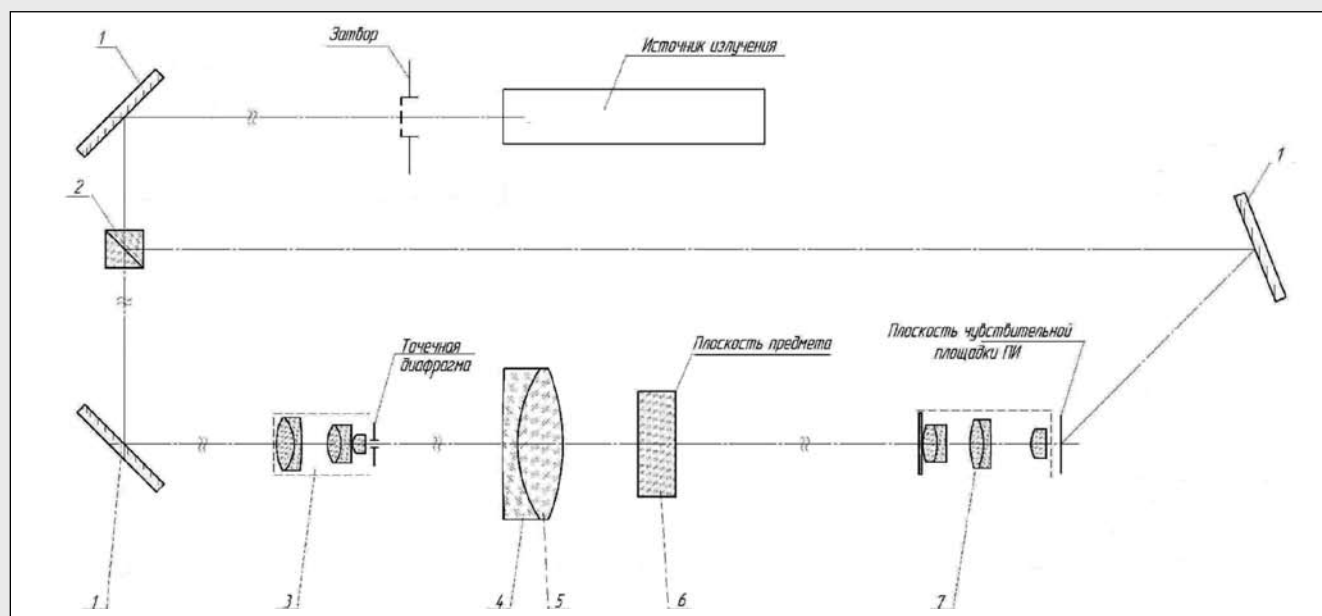


Рис. 1. Оптическая схема подсистемы перезаписи изображений фотошаблонов на ФГП оптико-электронного голографического литографа: 1 – система зеркал, 2 – светоделительный куб, 3 – микрообъектив ОС-42 с тубусом «бесконечность» и точечная диафрагма, 4 и 5 – объектив большого диаметра, состоящий из двух линз, 6 – пространственный модулятор света, 7 – репродукционный объектив и пластина с фотополимерным материалом

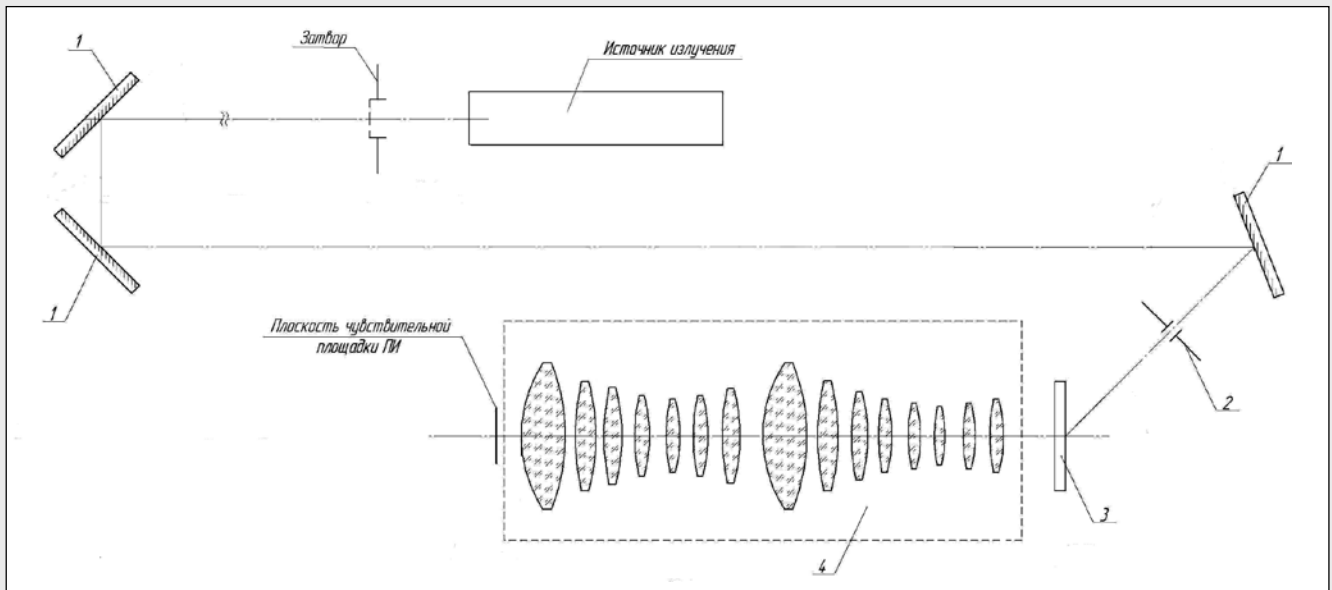


Рис. 2. Оптическая схема подсистемы восстановления изображения ФШ с ФГП с малократным проекционным объективом:
1 – система зеркал, 2 – диафрагма, 3 – ФГП, 4 – проекционный объектив

дая на своё. В настоящее время известны прецизионные системы перемещения, позволяющие позиционировать ФГП и пластинку с фоторезистом с точностью до 10 нм, что позволяет добиться требуемого разрешения получаемого фотошаблона.

3. Величина однократного смещения ФГП и пластинки с фоторезистом различны: если ФГП смещается на величину L , то пластинка с фоторезистом соответственно смещается на величину $L/4$, согласно масштабу малократного проекционного объектива 4.

Заключение

Разработанная схема изготовления фотошаблона позволяет устранить выявленные недостатки стандартной схемы голографического литографа, повысить производительность процессов записи и восстановления и снизить себестоимость работ на голографическом литографе. Возможность уменьшения восстановленного изображения относительно исходного, задаваемого ПМС, проекционным объективом степпера и дополнительным объективом, позволяет перейти к нанолитографии.

В подсистеме перезаписи изображений фотошаблонов были получены образцы ФГП с размерами (127×127) мм² в виде матрицы из 625 голограмм с пространственными частотами до 5000 лин/мм, каждая из которых восстанавливала изображение с разрешающей способностью до 1 мкм.

В подсистеме восстановления изображений фотошаблонов с ФГП были получены экспериментальные образцы фотошаблонов, параметры которых были проконтролированы на атомно-силовом микроскопе:

- размер пластинки (127×127) мм²;
- период структуры 17,11 мкм;
- глубина структуры 0,1 мкм;
- ширина углублений структуры 7,06 мкм.

Однако данный результат является промежуточным, потому что использовался гелий-кадмиевый лазер с длиной волны 441,6 нм. При переходе на меньшую длину волны получится меньший размер элемента разрешения. Это связано с тем, что при переходе на меньшую длину волны необходим расчёт новой оптической системы, позволяющей получать меньший кружок рассеяния. В будущем планируется получение структур с разрешением до 0,1 мкм. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент 7436487. G03B27/42 (США).
2. Патент 7399979. G03B27/42 (США).
3. Патент 6384899. G03B27/72 (США).
4. Ulrich W., Beiersdorfer S., Mann H.-J. // SPIE UC, Vol. 4.1, 2000.
5. Сейсян Р. Нанолитография СБИС в экстремально дальнем вакуумном ультрафиолете (обзор). Журнал технической физики. 2005. Т. 75. Вып. 5. С. 1–13,
6. Полещук А.Г., Корольков В.П. Методы изготовления и контроля дифракционных оптических элементов. Новосибирск, Институт автоматизации и электротехники СО РАН. 2007. С. 46.
7. Волков А.В., Казанский Н.Л., Павельев В.С. Автоматизированный исследовательско-технологический комплекс для формирования оптических микро- и наноструктур. Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королева, Институт систем обработки изображений РАН. 2006. С. 28.
8. Clube F, Gray S., Struchen D. et al. Large-field, high-resolution photolithography / SPIE. 1979. Vol. 3099. P. 36–45.
9. Clube F, Gray S., Struchen D. et al. Holographic microlithography. Optical engineering, September 1995. Vol. 34. No. 9. P. 2724–2730.
10. Патент 7092134. G03H1/04 (США).
11. Патент 7319551. G03H1/04 (США).
12. Патент 6088505. G03B6/00 (США).

**Шестая Международная Конференция
“ГОЛОГРАФИЯ ЭКСПО-2009”
“HOLOGRAPHY EXPO-2009”
Sixth International Conference**



Организаторы :

Специализированное предприятие “Голография”;
Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана;
Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН;
ООО “Голография-Сервис”.

Спонсоры:

СП “Голография”;
ОАО “Научно-производственное объединение “Криптен”;
ЗАО “Голографическая индустрия”;
ООО “Голография-Сервис”
ЗАО “ХолоГрэйт”.

1-2 июля 2009 г.
Украина, Киев, отель “Русь”
Ukraine, Kiev, hotel “Rus”
1-2 July 2009

2009

Министерство культуры Российской Федерации
Союз кинематографистов Российской Федерации
ФГУП «Московское конструкторское бюро
киноаппаратуры»

ОАО «Научно-исследовательский кинофотоинститут»
Санкт-Петербургский государственный
университет кино и телевидения
Московский киноvideоинститут

Приглашают 23–24 апреля 2009 г. принять участие в работе научно-технической конференции

**«ЗАПИСЬ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ОБЪЁМНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
В КИНЕМАТОГРАФЕ И ДРУГИХ ОТРАСЛЯХ»**

Конференция состоится в Московском киноvideоинституте по адресу: Москва, ул. Академика Королева, 21.

Организаторы рассчитывают, что данная конференция позволит провести комплексный анализ состояния отечественного 3D-кинематографа на всех этапах кинематографического процесса (от киносъёмки до кинопоказа) и выработать пути совершенствования:

- ЗАПИСИ, ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ОБЪЁМНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
- ПРОИЗВОДСТВА КИНТЕХНИКИ — ОТ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДО ВЫПУСКА НЕОБХОДИМЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ
- СОЗДАНИЯ, ЭКСПЛУАТАЦИИ И ХРАНЕНИЯ 3D-КОНТЕНТА

Цель конференции — обмен информацией, комплексный анализ и выработка путей совершенствования отечественного 3D кинематографа на всех этапах кинематографического процесса (от киносъёмки до кинопоказа) и на всех этапах производства кинотехники (от научных исследований до выпуска продукции: как кинотехники, так и контента).

На конференции планируется рассмотреть также вопросы применения объёмных изображений в медицине, учебных процессах, тренажёрах, защитных системах и т.д.

По итогам конференции
будет издан сборник докладов.
Командировочные расходы и оплата
гостиницы за счёт участников.
Срок подачи заявок на участие
в работе конференции с докладом
до 26 марта 2009 г.

Подробную информацию
о предстоящей конференции
можно узнать в оргкомитете по телефонам:
(495) 619-8611, (495) 618-8207,
(499) 157-45-09, (812) 315-70-04.

e-mail: ncenter@list.ru



АРХИВНАЯ

оптико-голографическая система памяти для хранения фильмов и телепередач

Е. Усович, студент 6-го курса МГТУ им. Н.Э. Баумана

Представлен принцип построения систем оптико-голографической памяти. Показана актуальность применения рассмотренных систем для архивного хранения фильмов и телепередач. Предложен и исследован метод мультиплексирования микроголограмм, позволяющий повысить скорость записи и считывания информации. Разработана и экспериментально апробирована оптическая система для реализации данного метода. Показана возможность мультиплексирования голограмм при использовании многоканальной записывающей головки и одновременного их считывания при использовании многоканальной считывающей головки. Преимущества и перспективность использования предложенного метода мультиплексирования и разработанной оптической системы для создания систем архивной оптико-голографической памяти заключаются в исключении необходимости механических перемещений элементов системы, отсутствии перекрёстных помех, а также в возможности использования для записи относительно тонких регистрирующих сред.

Введение

■ В комплексе проблем, связанных с обработкой больших объёмов информации, одной из актуальных является задача хранения больших объёмов архивной информации. Ежегодно требования к ёмкости систем хранения информации растут по оценкам специалистов примерно на 60% в год [1].

В то время как потребности хранения информации требуют увеличения ёмкости и быстродействия устройств массовой памяти, усовершенствование технологий современных оптических и магнитных систем хранения данных достигает физических пределов, которые ограничивают теоретически достижимые плотности записи информации.

Потребность архивной памяти сверхвысокой ёмкости применительно к киноиндустрии возникает по причине постоянного возрастания количества фильмов и телепередач, которые требуется хранить длительное время в цифровом формате. Увеличение объёмов хранимой информации происходит также при переходе на формат видео высокой чёткости (HDV – High Definition Video).

Ёмкость используемых в настоящее время носителей информации мала, а стоимость хранения единицы информации на них достаточно велика.

Одним из эффективных путей решения данной проблемы является технология оптико-голографической памяти (ОГП), в которой теоретически возможная плотность записи данных может составлять $\sim 1,0 \text{ ТБ/см}^3$ и скорость передачи данных – сотни мегабайт в секунду.

Устройства ОГП обеспечивают высокую защищённость и время хранения информации, а также высокую надёжность и помехоустойчивость хранения информации благодаря большой избыточности записи.

Таким образом, голографическая технология хранения информации является перспективной и на её разработку направлены усилия многих научно-исследовательских коллективов во всём мире.

Принципы построения систем оптико-голографической памяти

Впервые идею голографической (объёмной) памяти высказал сотрудник фирмы Polaroid Pieter van Heerden в 1963 году [2]. Сигнальный пучок представлял собой планарную решётку (страницу) пикселей, прозрачных или непрозрачных для падающего на них лазерного излучения, который в комбинации с опорным пучком формировал в объёмной регистрирующей среде интерференционную картину. Главной особенностью такой трёхмерной (3D) решётки являлось то, что записанная голографическая информация может быть восстановлена при условии, что считывающий пучок света должен быть по своей пространственной конфигурации тождественен пучку, используемому при записи голограммы. Вследствие этого, в одном локальном объёме фоточувствительной среды оказалось возможным записать и независимо считать множество страниц информации. Последнее обстоятельство позволяет, в принципе, получать плотность записи информации на два порядка выше, чем, например, в DVD системах [3].

Принцип записи и считывания информации в системе голографической памяти представлен на рисунках 1 и 2 [4, 5].

При записи информации (рис. 1) свет лазерного луча разделяется на два пучка: сигнальный, который несёт полезную информацию, и опорный, выполняющий служебные функции, в частности, для формирования

интерференционной структуры в месте расположения светочувствительного слоя. Кодирование данных в сигнальном потоке осуществляется при помощи так называемого пространственно-временного светового модулятора (ПВМС), который преобразует данные из двоичного кода, состоящего из нулей и единиц, в оптическую матрицу из светлых и тёмных пикселей, напоминающую шахматную доску. Данные объединены в массивы или страницы объёмом порядка миллиона бит, точное число которых определяется типом ПВМС. В месте пересечения опорного и сигнального пучков формируется интерференционная картина, регистрируемая фоточувствительной средой, в результате чего и получается голограмма.

Принцип считывания записанной информации также весьма прост и схематически показан на рисунке 2: при освещении восстанавливающим пучком носителя информации свет дифрагирует только на той голограмме, которая формировалась опорным пучком, тождественным восстанавливающему. В результате на выходе формируется пучок с ранее записанной информацией, которая считывается матричным приёмником излучения.

Ведущие мировые лидеры

В мире на сегодняшний день над созданием систем голографической памяти работает множество компаний. Одним из лидеров является компания InPhase Technologies, которая уже создала образцы систем голографической памяти объёмом 300 ГБ и к 2010 году планирует представить голографические диски диаметром 130 мм ёмкостью до 1,6 ТБ.

Сохранность информации в подобного рода накопителях, по словам производителя, будет гарантирована в течение 50 с лишним лет.

Одним из применений голографических дисков является, безусловно, профессиональная видеозапись, ведь эти диски позволяют записывать, редактировать, хранить и распространять видео на одних и тех же носителях.

Другим лидером в разработке ОГП является японская компания Optware, которая разработала новый способ голографической записи, названной ими коллинеарной голографией [7]. Основатель Optware ранее говорил о

возможности выпускать диски диаметром 120 мм и ёмкостью до 4 ТБ, до сих пор таких устройств нет даже в прототипах.

Среди других компаний, которые активно работают над голографической памятью – IBM, Samsung, Philips, Sony, Fujifilm.

Обзор методов мультиплексирования, применяемых в оптико-голографических системах памяти

Выше было упомянуто, что одним из основных достоинств применения голографического принципа для систем хранения информации является возможность записи на одном участке регистрирующей среды большого числа наложенных друг на друга голограмм, каждая из которых содержит «страницу» входной информации [8, 9]. Однако выполнение этого требования зависит от характеристик регистрирующей среды.

В настоящее время наибольшее внимание уделяется объёмным фазовым голограммам, обладающим высокой дифракционной эффективностью и хорошей селективностью.

Как известно [10], дифракционная эффективность (ДЭ) η объёмной фазовой пропускающей голограммы определяется фазовой модуляцией $\Delta\varphi$:

$$\eta = \sin^2 \Delta\varphi = \sin^2 \left[\frac{\pi \cdot \Delta n \cdot T}{\lambda_0 \cdot \cos \theta_0 \cdot n_0} \right], \quad (1)$$

где Δn – фотоиндуцированное изменение показателя преломления регистрирующей среды, T – толщина среды, λ_0 – длина волны излучения лазера, используемого при записи голограммы, $2\theta_0$ – угол между записывающими пучками в среде с показателем преломления n_0 .

Селективность определяется допустимыми с точки зрения уменьшения значения ДЭ отклонениями угловых $\delta\theta$ или спектральных $\delta\lambda$ от значений параметров θ_0 и λ_0 , при которых ДЭ имеет максимальное значение и которые связаны известным соотношением Брэгга:

$$2n_0 \cdot d \cdot \sin \theta_0 = \lambda_0, \quad (2)$$

где d определяет пространственный период решётки в области записи.

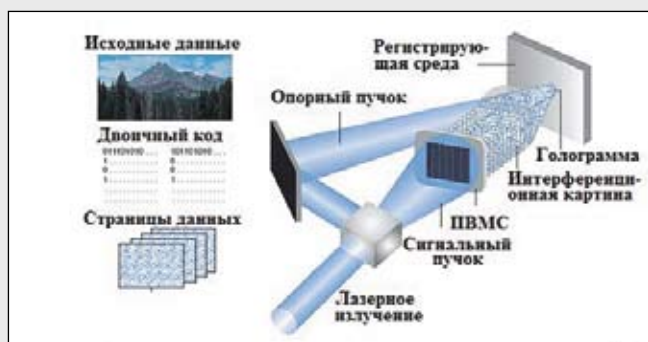


Рис. 1. Схема записи информации в системе оптико-голографической памяти



Рис. 2. Схема считывания информации в системе оптико-голографической памяти

В свою очередь, для случая фазовой пропускающей голограммы значение $\delta\theta$ может быть представлено соотношением [10]:

$$\delta\theta = \frac{\xi}{\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n_0}{\lambda_0}\right) \cdot T \cdot \sin\theta_0}, \quad (3)$$

в котором ξ – параметр, выбираемый из приведённых в [10] графиков зависимостей относительной дифракционной эффективности $\frac{\eta}{\eta_0}(\xi)$ (η и η_0 – соответственно

дифракционные эффективности при отклонении от угла Брэгга на величину $\delta\theta$ и при нулевом отклонении от этого угла).

Из (3) с учётом (2) получаем:

$$\delta\theta = \frac{\xi \cdot d}{\pi \cdot T} \quad (4)$$

При этом из соотношения (2) следует зависимость между $\delta\theta$ и $\delta\lambda$

$$\delta\theta = \frac{\delta\lambda}{\lambda_0} \cdot \operatorname{tg}\theta_0 \quad (5)$$

Из (1), (4) и (5) видно, что рассмотренные параметры η , $\delta\theta$ и $\delta\lambda$, определяющие возможности мультиплицирования в отношении числа одиночных микроголограмм в мультиплексной голограмме, в первую очередь зависят от пространственного периода d голограммы и от её толщины T . В частности, повышение селективных свойств объёмной голограммы, выражающееся в уменьшении значений $\delta\theta$ и $\delta\lambda$, связано с увеличением её толщины.

Для организации регистрации большого числа наложенных микроголограмм с целью повышения плотности записи за счёт селективности голограмм в настоящее время используется целый ряд методов мультиплексирования [11, 12], основные из которых схематично представлены на рисунке 3.

На рисунке 3а продемонстрирован метод углового мультиплексирования. Рисунок 3б иллюстрирует сдвиговое мультиплексирование. В случаях 3а и 3б возможны два варианта изменения опорного пучка при мультиплексировании – в плоскости А, либо в плоскости Б. На рисунке 3в демонстрируется метод мультиплексирования по длине волны, а также метод фазового мультиплексирования. Далее на рисунке 3г представлен метод мультиплексирования перистрофик.

Разрабатываются системы ОГП, использующие комбинации нескольких из вышеприведённых методов мультиплексирования [13].

Следует отметить некоторые недостатки систем, использующих приведённые выше методы мультиплексирования. Реализация этих методов предполагает наличие достаточно большого количества оптических элементов, большая часть из которых должна быть подвижна, что определяет сложность оптико-механических устройств системы в целом. При этом предполагается использование объёмных регистрирующих сред для записи мультиплексных голограмм, обладающих угловой и спектральной селективностью, достаточной для раздельного восстановления изображений с отдельных голограмм. Кроме того, восстановление голограмм в составе мультиплексных голограмм осуществляется последовательно, что снижает скорость воспроизведения информации. В России разработка систем ОГП тормозится отсутствием серийно изготавливаемых объёмных регистрирующих сред, в первую очередь, фотополимерных материалов [10, 11].

В настоящей статье рассматриваются пути создания ОГП на основе тонкой регистрирующей среды (галогенидосеребряных или фотополимерных материалов), с минимальным числом оптико-механических устройств перемещения и возможностью параллельного считывания информации.

Разработка метода и оптической системы для мультиплексирования голограмм и их считывания на основе многоканальных оптических головок

Для разработки устройства ОГП с высокой информационной ёмкостью и высокой скоростью считывания информации предлагается метод мультиплексирования, согласно которому при регистрации голограмм обеспечивается перпендикулярное падение опорного пучка на поверхность регистрирующей среды и наклонное падение предметных пучков (с числом пучков, равным числу

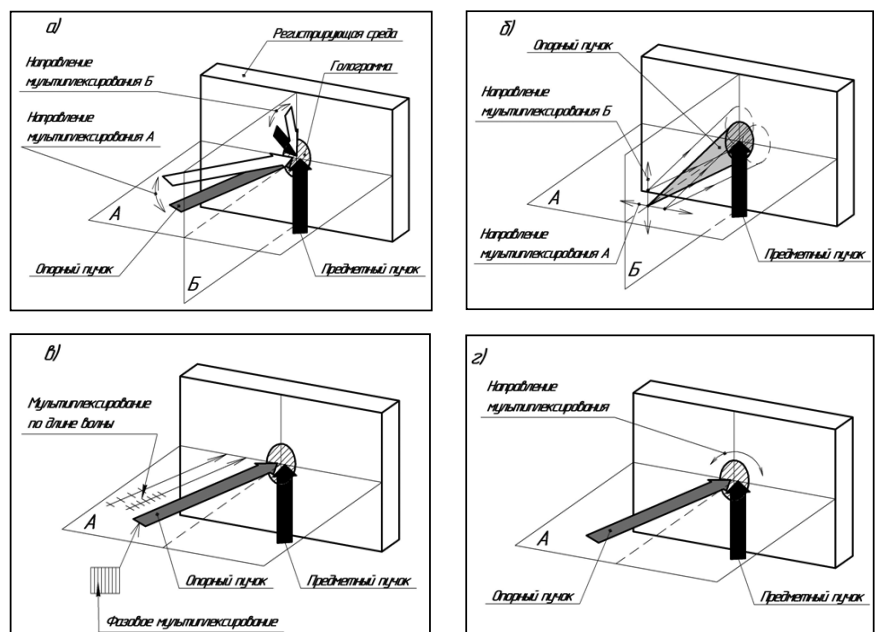


Рис. 3. Методы мультиплексирования голограмм

наложенных микроголограмм) при их концентрическом положении относительно оси опорного пучка.

На рисунке 4 представлена оптическая схема устройства записи мультиплексных голограмм с использованием многоканальной записывающей оптической головки с числом каналов, соответствующим числу голограмм в мультиплексной голограмме (до 20-ти), при их концентрическом положении относительно оси опорного пучка. Здесь излучение лазера 1 после прохождения через окно затвора 2 и отражения плоским зеркалом 4 расширяется и фильтруется системой в составе микрообъектива 9 и точечной диафрагмы 10 и затем коллимируется объективом 11. В схеме осуществляется пространственное деление общего коллимированного пучка излучения на опорный и предметные пучки по числу каналов записывающей головки. Для простоты изображения на оптической схеме (рис. 4) представлены только два диаметрально противоположных канала многоканальной записывающей головки. Центральная часть коллимированного пучка используется в качестве опорного пучка, падающего на фоточувствительную среду перпендикулярно её поверхности. Периферийная кольцевая часть

коллимированного пучка системой зеркал 16 и 17 распределяется по каналам многоканальной записывающей головки, расположенных симметрично относительно оси опорного пучка. В каждом из каналов излучение фильтруется системой в составе объектива 5 и точечной диафрагмы 6 и после прохождения через окно затвора 18 поступает на Фурье-преобразующий объектив (ФПО) 7 и пространственно-временной модулятор света (ПВМС) 8. Голографическая запись информации осуществляется путём последовательной регистрации интерференционной картины на фоточувствительной пластинке 13 в области пересечения предметных и опорного пучков на площади, ограниченной диафрагмой 12. Электронное управление работой затворов обеспечивает последовательную быструю запись микроголограмм при поочерёдном открывании затворов 18. Для записи всего массива мультиплексных голограмм осуществляется перемещение регистрирующей фотопластинки в плоскости, совпадающей с её поверхностью, по координатам X и Y с помощью двухкоординатного устройства перемещения в составе частей 14 и 15.

При считывании информации с мультиплексной голограммы, записанной с помощью данного устройства записи, пучки излучения со всех микроголограмм, составляющих мультиплексную голограмму, восстанавливаются одновременно, при этом восстановленные пучки пространственно разделены. Считывание информации осуществляется с помощью многоканальной считывающей оптической головки с числом фотоприёмных каналов считывания, равным числу записанных голограмм (рис. 5).

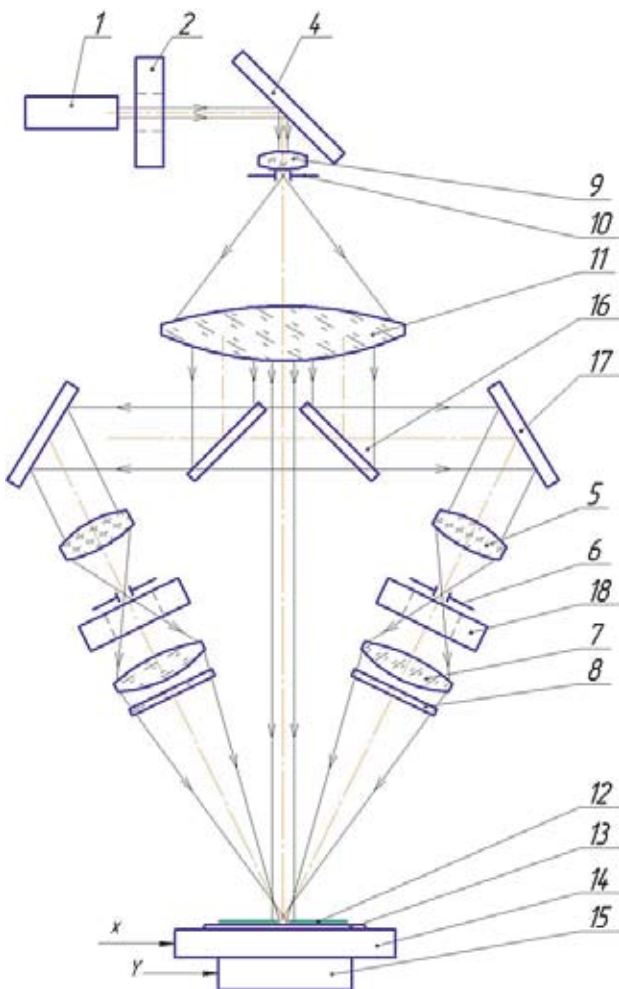


Рис. 4. Устройство записи мультиплексных голограмм в системе архивной оптико-голографической памяти с использованием многоканальной записывающей головки

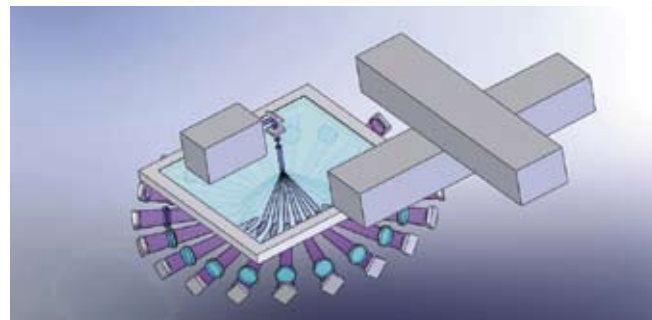


Рис. 5. 3D-изображение конструкции 20-канальной оптической считывающей головки АОГП

Таким образом, построение устройства ОГП по предложенному методу мультиплексирования и использование в устройстве многоканальной оптической головки записи, а при последующем считывании многоканальной считывающей оптической головкой при одновременной работе каналов на стадии считывания позволяет:

1) устранить вращение регистрирующей среды, тем самым упростить систему и уменьшить требования к её механической стабильности;

2) реализовать параллельный процесс считывания отдельных микроголограмм, что обеспечивает более высокую скорость считывания информации.

Экспериментальное апробирование предложенного метода и оптической системы записи мультиплексных голограмм

В предложенном методе можно использовать регистрирующие среды с различной толщиной фоточувствительного слоя: от 7–20 мкм до 1 мм, на котором регистрируются как тонкослойные трёхмерные голограммы, так и объёмные (3D) голограммы. В работе были проведены измерения основных параметров перспективных для ОГП фотополимерных и галогенидосеребряных материалов (ФПМ и ГСМ) (см. таблицу 1).

Как показали исследования, ФПМ «Диффен» (Т~1000–2000 мкм) обладает самой высокой ДЭ и угловой селективностью и высокой однородностью. Однако по чувствительности он уступает ГСМ.

Недостатком ГСМ являются необходимость «мокрой» фотохимической постобработки и небольшая толщина. Однако ГСМ обладают очень высокой чувствительностью (что позволяет значительно снизить время экспонирования и ускорить процесс записи голограмм) и технологичностью, а также демонстрируют значительные сроки хранения голограмм без потери их качества (более 10 лет). Поэтому для записи матрицы мультиплексных голограмм в качестве фоточувствительного материала были использованы серийно выпускаемые ГСМ – голографические фотопластинки ПФГ-03М с толщиной фоточувствительного слоя ~7–12 мкм, серийно изготавливаемые на ОАО «Славич» в г. Переславль-Залесский [15].

Предложенный метод мультиплексирования был исследован на макете устройства записи ОГП, где использовались гелий – кадмиевый лазер с длиной волны 0,441 мкм и мощностью 150 мВт, жидко-кристаллический (ЖК) ПВМС (600x800 элементов, с шагом исходной структуры 14 мкм, частота смены кадров 60 Гц). Регистрируемая часть интерференционной картины выделялась диафрагмой диаметром 3 мм, расположенной непосредственно на поверхности фоточувствительной пластины.

Количество записываемых голограмм на одну мультиплексную голограмму определяется также габаритными соотношениями, поскольку изображения со всех нало-

женных голограмм восстанавливаются одновременно и должны быть пространственно разнесены. Экспериментально проверена возможность записи мультиплексных голограмм, каждая из которых содержит 20 голограмм. Время ввода цифровой информации на один ЖК – ПВМС 16 мс, а период записи 20 мс. При этом общее время записи информации на мультиплексную голограмму составляет 0,4 с.

При считывании информации, несмотря на небольшую толщину чувствительного слоя галогенида серебра (Т~7–12 мкм), осуществляется брэгговская селекция 1-го порядка, что позволяет избежать наложения разных порядков дифракции и уменьшает перекрёстные помехи.

На макете ОГП были записаны мультиплексные голограммы вплотную друг к другу в виде ортогональной матрицы с шагом 3 мм. Предельная размерность матрицы, которая была записана на фоточувствительную пластину размером (127x127) мм², – 40x40 мультиплексных голограмм. В дальнейшем размер мультиплексной голограммы может быть существенно уменьшен, а число наложенных голограмм – увеличено посредством совершенствования оптической системы устройства.

На рисунке 6а приведена структура информационной страницы, выводимой на ЖК-ПВМС при записи микроголограммы. Структура представляет собой «шахматное поле». Каждая клетка шахматного поля соответствует одному биту информации (включая кодирование информации) и представлена участком ЖК-ПВМС 4x4 пикселя, что позволяет уверенно производить запись и считывание информационной страницы ёмкостью 200x150 бит. На рисунке 6б приведена фотография фрагмента, восстановленного с микроголограммы и спроецированного на поверхность матричного фотоприёмника. В качестве фотоприёмного устройства в системе считывания был использован матричный приёмник на КМОП матрице типа MT9T001P12STC (производства Micron Technology Inc.) с числом пикселей 1600x1200, быстродействием до 20 кадров/с (время считывания одной страницы 50 мс), размером пикселя 3,0x3,2 мкм, размер активной области 6,55x4,92 мм.

Таблица 1. Основные параметры ФПС и ГСМ

Фоточувствительный материал/изготовитель	Дифракционная эффективность, %	Оптимальная экспозиция, Дж/см ²	Угловая селективность $\Delta\theta_{0,1}$, град.	Время постэкспозиционной обработки, час.
Фотополимерный материал / ИОХ и ИА и Э СО РАН, г. Новосибирск	до 15	20 $\lambda=650$ нм	3,3	0,5
Фотополимерный материал «Диффен» / Санкт-Петербургский ГУ ИТМО	до 80	$2 \cdot 10^{-2}$ $\lambda=480$ нм	0,5	50
Пластинки с галогенидосеребряным слоем ПФГ-03М/ОАО «Славич», г. Переславль-Залесский	до 2–3	$2 \cdot 10^{-4}$ $\lambda=632$ нм	4	0,5

Таким образом, в ходе экспериментов по записи матрицы голограмм были получены следующие параметры матрицы мультиплексных голограмм: число мультиплексных голограмм в матрице – до 40х40 шт.; диаметр одной мультиплексной голограммы – 2,5–3 мм; число наложенных голограмм – от 10 до 20 шт.; общее количество голограмм – до 32000 шт.; информационная ёмкость матрицы мультиплексных голограмм (при размере пластинки (127х127) мм² – до 150 Мбайт.

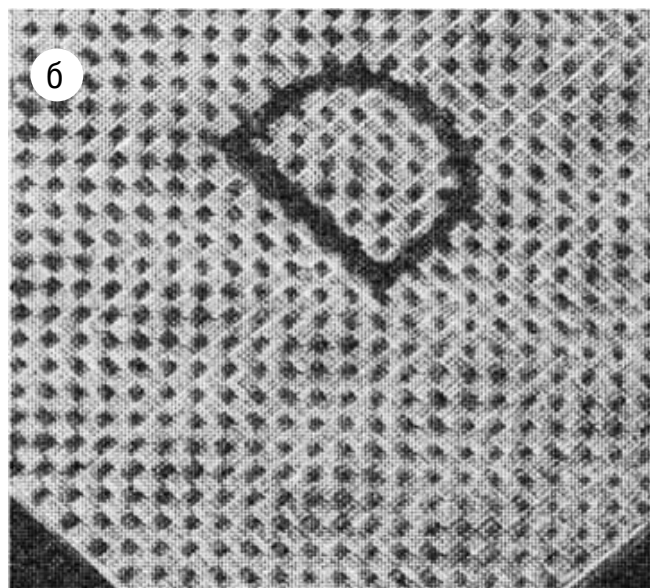


Рис. 6. Фотографии структуры входной страницы информации, подаваемой на ПВМС (а), и фрагмента выходной страницы информации на фотоприёмнике (б)

Заключение

В ходе проведённых исследований в области разработки устройств ОГП был предложен метод мультиплексирования, который позволяет обеспечить достаточно высокую скорость считывания информации, а также исключить вращательное движение элементов устройства и упростить конструкцию устройства ОГП.

Экспериментальные исследования применения данного метода в разработанной оптической системе показали возможность последовательной записи 20 наложенных микроголограмм путём последовательного электронного переключения каналов ЖК-ПВМС в записывающей головке и одновременного воспроизведения их без перекрёстных искажений.

Предложенный метод обеспечивает возможность использования относительно тонких регистрирующих сред, например, галогенидосеребряных материалов.

Рассмотренный в статье тип системы оптико-голографической памяти подходит для архивного хранения фильмов и телепередач, а также позволяет хранить и просматривать фильмы в формате видео высокой чёткости. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. White paper. Technical report, Constellation 3D, June 2000. <http://www.c-3d.net/whitepaper.html>;
2. Van Heerden P.J. Theory of optical information storage in solids, *Appl. Opt.*, 2, 393 (1963).
3. Psaltis D. Coherent optical information systems, *Science*, 298, 1359 (2002)
4. Ashley J. et al. «Holographic data storage», *IBM J. of Research and Developmen*, Vol. 44, № 3 (2000).
5. <http://www.research.ibm.com./journal/rd/443/ashley.html>;
6. Huang G.T. Holography memory, *Technology review*. Sept. 2005. P. 3–5.
7. Holographic versatile disc. http://en.wikipedia.org/wiki/Holographic_Versatile_Disc
8. Coufal H.J., Psaltis D. and G.T. Sincerbox, eds. *Holographic Data Storage*, Springer Series in Optical Sciences (Springer-Verlag, 2000).
9. Orlov S.S., Phillips W., Bjornson E., Takashima Y., Sundaram P., Hesselink L., Okas R., Kwan D. and Snyder R. High-transfer-rate high-capacity holographic disk data-storage system. // *Appl. Opt.* 2004. V. 43. P. 4902–4914.
10. Kogelnik H. Coupled Wave for Thick Gratings // *System Technical Journal*. 1969. V. 48. № 9. P. 2909–2947.
11. Barbastathis G., and Psaltis D. Volume holographic multiplex methods, In *Holographic data storage*. Psaltis D. and G. T. Sincerbox, eds. Springer Series in Optical Sciences (Springer – Verlag, 2000).
12. Fernandez E., Garcia C., Pascual I., Ortuno M., Gallego S. and Belendez A. Optimization of a thick polyvinyl alcohol-acrylamide photopolymer for data storage using a combination of angular and peristrophic holographic multiplexing. // *Appl. Opt.* 2006. V. 45. № 29. P. 7661–7666.
13. Ju-Seong Jang et al. Holographic data storage by combined use of peristrophic, angular, and spatial multiplexing // *Optical Engineering*. 2000. V. 39. № 11. P. 2975–2981.
14. Пен Е.Ф., Родионов М.Ю., Шелковников В.В. Влияние неоднородности объёмных голограмм в фотополимерных материалах на их селективные свойства // *Оптический журнал*. 2006. Т. 73, № 7. С. 60–64.
15. <http://www.slavich.ru/products/foto/fotoplastin/hihologo>.



Н.А. Майоров,
режиссёр, сценарист,
член Международной
Федерации
журналистов

КРУГОРАМНЫЕ СИСТЕМЫ КИНЕМАТОГРАФА

■ Для кого-то это кино-аттракцион, ярмарочная забава. Для кого-то – неперенный атрибут национальной экспозиции на мировых выставках второй половины XX века. Для кого-то – окно в мир. Именно окном в мир, тридцатикопеечным средством путешествия по просторам нашей страны и зарубежным странам, пусть не таким далёким, стала для советского человека в эпоху

пейзажа. За двадцать минут можно покорить вершины Эльбруса, опуститься на морское дно к диковинным рыбам, плавающим вокруг тебя. Выйти сухим из воды и взлететь в небесную высь, чтобы пролететь, как птица, над дворцами и пригородами Ленинграда.

Сегодня, когда нет уже и в помине «железного занавеса» и когда «домашний кинотеатр» становится таким



Роберт Баркер «Панорама Эдинбурга», 1787 г.



Фрагмент панорамы Ф. Рубо «Оборона Севастополя»



Фрагмент панорамы Ф. Рубо «Бородинская битва»

«железного занавеса» круговая кинопанорама на ВДНХ СССР. Не каждому было по карману проехать по красивейшим местам нашей Родины, а тем более погулять по улицам Вены, Берлина, Праги. Ни один вид кинематографа не давал и не даёт до сих пор такой возможности – возможности оглянуться назад и увидеть там не стенку зрительного зала, а продолжение горного

же неперенным атрибутом в доме, как холодильник и стиральная машина, когда никого не удивишь ни широким экраном, ни окружающим оглушающим звуком, круговая кинопанорама остаётся единственным видом кинематографа, который позволяет создать почти полную иллюзию присутствия зрителя на месте происходящего события, в его эпицентре.

Не случайно, давая определение панорамы, В.И. Даль писал: «ПАНОРАМА – круговая картина, обманывающая зрителя, считающего себя посреди изображённой вокруг его местности».

Первая живописная панорама больших размеров была создана ирландским художником Робертом Баркером (Robert Barker, 1739–1806) в 1787 году в Эдинбурге.

В начале XIX века в крупных европейских городах экспонировались различные панорамы. Одна из них была выстроена в 1839 году в Париже и имела диаметр 42 мет-

Первая отечественная живописная панорама «Штурм аула Ахульго», посвящённая взятию русскими войсками резиденции Шамиля в 1839 году, появилась в России в конце XIX века и принадлежала кисти русского художника Франца Алексеевича Рубо (1856–1928). Эта панорама с большим успехом демонстрировалась в Санкт-Петербурге, Нижнем Новгороде, Севастополе, Мюнхене и Париже. За эту работу Франц Алексеевич был награждён во Франции орденом Почётного легиона, а в Баварии – орденом Святого Михаила и получил почётное



Фрагмент круговой фотопанорамы Москвы с храма Христа Спасителя 1897 года

ра в поперечнике. В Вене демонстрировалась панорама Иерусалима со сценой распятия Иисуса Христа, которая сгорела в 1892 году.

звание профессора Баварской Академии художеств.

В 1905 году в Севастополе открылась панорама «Оборона Севастополя», а в 1912 году в Москве начала демонстрироваться панорама «Бородинская битва».

С появлением и развитием фотографии в разных странах начали сниматься фотографические панорамы. Но это, как правило, были панорамы, состоящие из нескольких кадров, но не охватывающие полную окружность.

В 1867 году один из совладельцев московской фотографической фирмы «Шерер, Набогльц, бывшая Бергнера» Мартин Николаевич Шерер снял первую фотографическую круговую панораму Москвы. Панорамная съёмка проводилась с храма Христа Спасителя по часовой стрелке, начиная с Андреевской богадельни, и далее по кругу. Отпечатанная панорама состояла из 16 листов размером 40,7x39,3 см каждый. Изданная в этом же году, она стала одной из лучших документальных панорам Москвы XIX века. Экземпляры панорамы М.Н. Шерера сохранились до наших дней в РГАКФД и Отделе архитектурной графики ГИМ.



Рекламный плакат павильона «Синеорамы» на Всемирной выставке в Париже (1900)

Синеорама (Cineorama)

Изобретатель панорамного фотоаппарата Мёссер в 1882 году первым высказал идею проекции фотографических изображений на цилиндрический замкнутый экран. Эта идея была реализована в «Циклораме» (Electric Ciclorama) Чарльза Чейза (Charles A.Chase), где

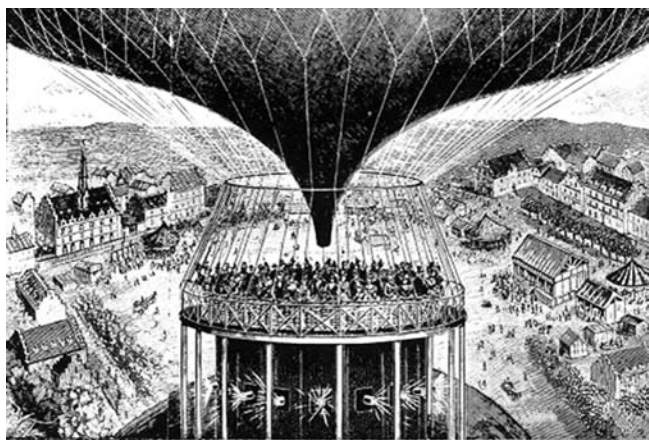
неподвижные фотографии проецировались на 18-ти метровый цилиндрический экран.

Уже в первые годы существования кинематографа возникла идея показа движущихся изображений на замкнутый экран.

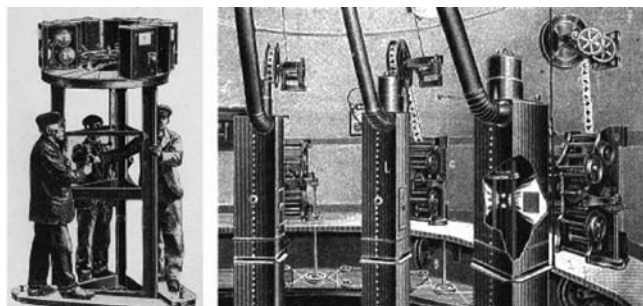
Первая круговая кинопанорама «Синеорама» или «Синекосмограма» (Cineorama/Cinocosmorama) была запатентована 25 ноября 1897 года Раулем Гримуэном-Сансоном (Raoul Grimoin-Sanson). Павильон «Синеорама» (Cineorama) был открыт на Всемирной выставке в Париже в 1900 году. Гримуэн-Сансон построил под Эйфелевой башней зал окружностью 100 метров, стены которого служили сплошным экраном. Площадка в центре зала для размещения зрителей была декорирована под гондолу воздушного шара с якорем, лестницей, канатами, мешками с балластом и другими атрибутами. Для создания у зрителей полной иллюзии нахождения в гондole потолок был задрапирован специальной тканью.

Десять проекционных аппаратов располагались в киноаппаратной под гондолой. Каждый аппарат проецировал изображение в пределах угла в 36°. Для синхронной работы все кинопроекторы были механически связаны друг с другом.

Для съёмки и проекции круговой кинопанорамы использовались десять 75-мм плёнок с размером кадра 57х64 мм каждая. Съёмка производилась специально



Внутренний вид павильона «Синеорама» во время демонстрации фильма



Съёмочная камера (слева) и киноаппаратная «Синеорамы» (справа)

разработанной киносъёмочной аппаратурой. Первый и единственный фильм состоял из натуральных съёмок в Англии, Барселоне, Брюсселе, Ницце, Сахаре и Северной Африке. Некоторые фрагменты были раскрашены художниками, чтобы обеспечить цветное киноизображение. Качество проекции первой круговой кинопанорамы из-за невысоких светотехнических возможностей оптики и проекционной аппаратуры было низким даже при использовании дуговых ламп.

Зрители с большим трудом могли различать детали изображения. Использование мощных ламп 10-ти кинопроекторов приводило к перегреву воздуха в киноаппаратной до 60°C, что привело к несчастному случаю с кинотехником, и полиция закрыла кинопанораму после третьего сеанса.

Циркарама (Circarama)

Уолт Дисней (Walt Disney) через полвека после неудачи Гримуэна-Сансона создал круговую панораму – «Циркарама» (Circarama) на основе самых современных технологий своего времени. Для съёмки и проекции использовалась обращаемая 16-мм цветная киноплёнка «Кодахром». Съёмка производилась одиннадцатью синхронно работающими 16-мм кинокамерами «Кодак», смонтированными на круговой опоре, охватывающими горизонт в 360°. Фокусное расстояние объектива каждой камеры 15 мм, угол 32,7° ($32,7^\circ \times 11 = 360^\circ$).



Демонстрация фильма в кинотеатре «Циркарама» (1955)

Для демонстрации кругорамного фильма, в парке «Диснейленд» (Disneyland) в Калифорнии было построено специальное здание с 38-метровым цилиндрическим экраном диаметром 12 м, состоявшим из 11 экранов высотой 2,4 и шириной 3,2 метра. Каждый экран отделён от другого чёрной вертикальной полосой в 15 см для того, чтобы устранить видимость стыков между соседними изображениями и сделать менее заметными параллаксные ошибки у краёв кадров. Экраны установлены на высоте 2,4 м от пола, и зрители, находившиеся в зале стоя, без помех могли рассматривать изображение.

Монофоническая фонограмма воспроизводилась с отдельной 17,5-мм магнитной плёнки синхронно с одиннадцатью киноплёнками в проекционных аппаратах.

Премьера первого кругорамного фильма У. Диснея «A Tour of the West» («Путешествие по Западу») состоялась в день открытия парка «Диснейленд» 17 июля 1955 года.

Кругорамные фильмы Диснея носили видовой характер. Кадры пейзажей и памятников архитектуры, съёмки с движения создавали у зрителей эффект участия в происходящем на экране.

В 1958 году на Всемирной выставке в Брюсселе в американском павильоне работал второй кинотеатр по системе «Circarama» с экраном диаметром 13,6 м и длиной окружности 42,6 м. Каждый из одиннадцати экранов был высотой 2,7 м и шириной 3,6 м.

Третий кинотеатр с размерами, идентичными кинотеатру в Диснейленде, работал в июле и августе 1959 года на Американской выставке в Москве, где демонстрировался фильм «Путешествие по Западу», дополненный съёмками в Вашингтоне. Во время просмотра этого фильма зрители как бы совершали путешествие по Америке, которое начиналось от статуи Свободы в гавани Нью-Йорка. Камера переносила зрителей в район Великих озёр, показывала величественную панораму Гранд Каньона и прерий Среднего Запада. Промчавшись по одной из широчайших автострад с востока на запад, мы оказывались в ночном Лос-Анжелесе. Фильм заканчивался показом исторических достопримечательностей современной жизни США.

Успех «Circarama» был несомненным. Однако, применяемая для съёмки и проекции 16-мм плёнка с маленькой площадью кадра плохо передавала детали изображения. А узкоплёночные кинопроекторы переносного типа фирмы «Кодак» не могли обеспечить необходимую яркость



16-мм позитив одного из постов кругорамного фильма по системе «Циркарама»



Установка из 16-мм кинокамер «Arriflex» для съёмки кругорамного фильма по 9-ти камерной системе «Циркарама»

изображения на экранах, что снижало качество демонстрируемого фильма. Для улучшения качества проекции и обеспечения высокой яркости изображения с 16-мм оригинала начали печатать 35-мм копии и демонстрировать их 35-мм кинопроекторами, обеспечивающими большой световой поток. В дальнейшем и съёмку фильмов стали производить на 35-мм киноплёнку, что существенно сказалось на улучшении качества изображения.

В 1960 году в Турине (Италия) и 1964 году в Лозанне (Швейцария), в 1967 году на международной выставке «ЭКСПО-67» в Монреале (Канада) и на «ЭКСПО-70» в 1970 году в Австралии открылись кинотеатры «Circarama», где фильм демонстрировался на 9-ти экранах с 35-мм плён-

ки. Самый большой экран был в туринской «Circarama» – его окружность составляла 94 метра.

В 1961 году 16-мм 11-ти экранная система «Circarama» в Диснейленде была закрыта.

Циркле Вижн 360 (Circle Vision 360)

25 июня 1967 года в калифорнийском Диснейленде открылся новый кинотеатр круговой кинопанорамы Диснея по системе «Циркле Вижн 360» (Circle Vision 360), где демонстрировался последний кругорамный фильм, снятый при жизни Диснея, «America the Beautiful» («Прекрасная Америка»). По системе «Circle Vision 360» фильмы снимаются 11 камерами, но на 35-мм плёнке со стандартным размером кадра.

Айверкс 360 (Iwerks 360)

В 1986 году в США была организована фирма «Iwerks Entertainment Inc.», разработавшая и внедрившая новую систему кругорамы «Айверкс 360» (Iwerks 360®). Съёмка и демонстрация фильмов по этой системе производится девятью камерами со стандартным форматом кадра в 4 перфорации. Компания открыла по всему миру более 50 кинотеатров для демонстрации кругорамных фильмов.

В 1993 году кинокомпания «BRC Imagination Arts» выпустила первый кругорамный фильм по системе «Iwerks 360» – «Postcards» («Почтовые открытки»), режиссёр Крайг Бартлетт (Craig Bartlett), оператор Карл Херрманн (Karl Herrmann).

Этот видовой десятиминутный фильм, построенный на переписке корейской девушки с её друзьями и их рассказах о своих странах и городах. Съёмки проводились в Корее, Париже, Большом Каньоне, Бали, Африке и Канаде.

Кругорама по системе «Айверкс 360», вероятно, стала последней реализованной и эксплуатируемой системой кругорамного кинематографа с использованием для съёмки и проекции киноплёнки.

Развитие цифровых технологий съёмки с большим разрешением, высококачественная проекция цифрового изображения на большие экраны делают бессмысленным использование дорогостоящих киноматериалов, а главное, облегчают процесс создания кругорамных фильмов высочайшего качества, практически не достижимое при использовании киноплёночных технологий. Очевидно, что качество цвета цифрового изображения не страдает выцветанием и не ухудшается со временем. Уже сегодня созданы специальные компьютерные программы, позволяющие просчитывать и вносить в проецируемое на сильно изогнутый экран изображение необходимые изменения для устранения искажений. Использование цифровых технологий позволяет избавиться от разделительных полос и получать единое, безразрывное окружающее изображение, сливая воедино панорамную картинку, снятую несколькими камерами. Да и для съёмки кругорамного фильма цифровым способом уже нет необходимости использовать 9 камер,

вполне достаточно четырёх или даже трёх. Понятно, что для организации проекции кругорамного фильма, снятого цифровыми камерами, нет необходимости и строить специальные кинотеатры с кинопроекторными аппаратными по окружности зала. Современные видеопроекторы могут устанавливаться непосредственно в зале и не займут много места. В принципе, цифровые кругорамные фильмы можно демонстрировать в любом помещении, достаточно только повесить замкнутый экран. И это не фантастика, а вполне реальное, совсем недалёкое будущее или уже настоящее (ведь лет десять назад DVD диск с многочасовым фильмом казался фантастикой!). Постоянно совершенствуется съёмочная видеотехника: увеличивается разрешающая способность матриц, улучшается качество картинки, уменьшается вес видеокамер и их цена... Мне не кажется фантастичным, что современный «домашний кинотеатр» в недалёком будущем может превратиться в «домашнюю кругораму», где можно будет предаваться воспоминаниям, совершая кругорамные видео путешествия, просматривая самостоятельно отснятые во время отдыха при помощи компактной кругорамной видеоустановки фильмы.

Фильмография кругорамных фильмов, снятых по системам «Circarama®», «Circle-Vision 360®» и «Iwerks 360®».

Все фильмы цветные с монофоническим звуком.



Кинотеатр «Circarama» в Диснейленде

Circarama® (11x16 мм, моно)

«A Tour of the West» («Путешествие по Западу»), США, Walt Disney Productions, 1955, цв. (Eastmancolor), 12 мин. ВЭ 17.07.1955. Режиссёр Питер Элленшау (Peter Ellenshaw).

«America the Beautiful» («Америка прекрасна»), США, Walt Disney Productions, 1958, 16 мин.

Circle-Vision 360® (9x35 мм, моно)

«Italia '61» («Италия '61»), США-Италия, Walt Disney Productions, 1961, 20 мин.

«Canada '67» («Канада '67»), США, Walt Disney Productions, 1967, 18 мин.

«America the Beautiful» («Америка прекрасна»), США, Walt Disney Productions, 1967, 20 мин. ВЭ 25.06.1967.

«Magic Carpet 'Round the World», США, Walt Disney Productions, 1974, 20 мин. ВЭ 16.03.1974.

«America the Beautiful» («Америка прекрасна»), США, Walt Disney Productions, 1975, 20 мин.

«Wonders of China», США, Walt Disney Productions, 1982, 19 мин. ВЭ 28.09.1982.

«O Canada!» («O Канада!»), США, Walt Disney Productions, 1982, 18 мин. ВЭ 28.09.1982.

«Impressions de France», США, Walt Disney Productions, 1982, 18 мин. ВЭ 28.09.1982.

«American Journeys», США, Walt Disney Productions, 1984, 21 мин. ВЭ 04.07.1984.

«Portraits of Canada», США, Walt Disney Productions, 1986, 20 мин. ВЭ 02.05.1986.

«From Time to Time», США-Франция, Walt Disney Productions, 1992, 18 мин. ВЭ 12.04.1992.

IWERKS 360® (9x35 мм)

«Postcards», 1993, 10 мин.

«Dinosaur Adventure», 1993, 15 мин.

«Virtual Vacations», 1995, 15 мин.

«Berlin Symphony», 2000, 10 мин.

«Couleurs Bresil», 2000. ■

Продолжение следует



Киносеанс в кинотеатре «Circle-Vision 360»



ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ по прикладной голографии

О.В. Андреева,
к.ф.-м.н., СПб ГОИ

Продолжение

Голограмма фазовая – голограмма, дифракция излучения на которой обусловлена изменением показателя преломления среды (в случае анизотропных сред – тензора диэлектрической проницаемости), либо изменением толщины среды (рельефграфические материалы). Статические фазовые голограммы получают на галогеносеребряных фотографических материалах (с применением постэкспозиционной обработки, преобразующей проявленное серебро в соли серебра, прозрачные в видимом диапазоне спектра), фотоматериалах на основе бихромированной желатины, фотополимерах и других. Для получения динамических фазовых голограмм используют фоторефрактивные электрооптические и жидкие кристаллы; прозрачные и слабо поглощающие нелинейные оптические среды. Максимальные значения дифракционной эффективности фазовой голограммы – 33% для двумерных и 100% для трёхмерных голограмм практически реализованы при использовании современных регистрирующих сред. Фазовые голограммы получили широкое распространение во многих приложениях голографии, включая изобразительную голографию, получение голограммных оптических элементов и т.д.

Голограмма цифровая – голограмма, структура которой рассчитана с использованием численных методов. В технической литературе существует ряд синонимов: синтезированная голограмма, компьютерная голограмма, искусственная голограмма, каждый из которых имеет специфические особенности и области применения, так что в настоящее время нельзя полноценно заменить один термин другим без понимания конкретного научного контекста.

Голограммный оптический элемент (ГОЭ) – оптический элемент для преобразования излучения, изготовленный с помощью голографического метода.

Голографическая интерферометрия – получение, наблюдение и интерпретация интерференционных картин, образованных волнами, из которых хотя бы одна зарегистрирована и восстановлена голограммой. При считывании (реконструкции) голограммы в схеме записи при наличии объекта возникают две волны, распространяющиеся в одном направлении – одна, рассеянная непосредственно объектом, и другая, восстановленная голограммой и являющаяся копией той волны, которая формировалась объектом во время экспонирования голограммы. Эти волны являются когерентными и могут интерферировать. Изменения, происходящие с объектом (деформация или локальное изменение показателя преломления), ведущие к фазовым искажениям объектной

волны, приведут к изменениям в форме и характере полюс наблюдаемой интерференционной картины.

При использовании голографической интерферометрии в реальном времени интерференционную картину наблюдают одновременно с изменениями, происходящими с объектом.

При использовании метода двух экспозиций на одной регистрирующей среде последовательно регистрируют две голограммы, соответствующие двум различным состояниям одного и того же объекта. При реконструкции такой двух экспозиционной голограммы одновременно восстанавливаются и интерферируют между собой две волны, являющиеся голографическими копиями объектных волн, существовавших во время разных экспозиций.

При использовании так называемых двух длинноволновых методов на одной регистрирующей среде в течение одной экспозиции регистрируется интерференционная картина, образованная волнами разной частоты (использование источника излучения двух или более длин волн). При реконструкции такой голограммы монохроматическим излучением восстановленные волны образуют интерференционную картину (соответствующую различию их фазового рельефа), обусловленную как различием длин волн, так и дисперсией исследуемого объекта. Этот метод используют для исследования дисперсии плазмы, а также для изучения рельефа поверхностей.

Основные преимущества голографической интерферометрии при сравнении с методами классической интерферометрии заключаются в следующем:

- широкие возможности исследования прозрачных и отражающих объектов любой формы и качества поверхности (включая диффузно отражающие объекты);
- снижение требований к качеству оптики за счёт дифференциального характера метода;
- возможность сравнения световых волн, рассеянных (сформированных) объектом в разные моменты времени;
- возможность исследования интерференции волн, рассеянных объектом в разных направлениях в пределах телесного угла, который охватывает голограмма;
- возможность получать картину интерференции световых волн различной частоты.

К недостаткам голографической интерферометрии следует отнести значительную длительность экспозиции за счёт низкой чувствительности высокоразрешающих сред для регистрации голограмм, а также высокие требования к используемым источникам излучения (пространственная и временная когерентность, мощность излучения и т.д.)

Продолжение следует



ОБРАБОТКА ЦВЕТА ДЛЯ ЦИФРОВОГО КИНЕМАТОГРАФА 1:

Основные положения, кодирующие и декодирующие равенства, кодирование цветового базиса и показатель степени (1/2.6)



Thomas O. Maier

COLOR PROCESSING FOR DIGITAL CINEMA 1: Background, Encoding and Decoding Equations, Encoding Primaries, and the Exponent (1/2.6)

■ Перевод В. Сычёва, к.т.н., ОАО «НИКФИ»

Эта серия статей по цветовой обработке для цифрового кинематографа основана на Руководстве для инженеров SMPTE 432-1. Комитет DC28 надеется, что информация этого руководства будет более доступна, если опубликовать её в виде серии журнальных статей. В данной, первой в серии, статье будут описаны положения, на основе которых разработаны кодирующие равенства, и затем приведены принятые в результате равенства. Из кодирующих равенств следуют декодирующие равенства. И, наконец, в настоящей статье будут описаны дискуссии, приведшие к выбору кодирующего базиса и показателя степени (1/2.6) в равенствах.

■ Все стандарты, которые необходимы для кодирования и декодирования цветовой информации для цифрового кинематографа, уже опубликованы. Любой стандарт описывает только результат окончательного консенсуса людей, вовлечённых в написание этого стандарта, и не включает причины выбора того, что в него входит. Кроме того, поскольку каждый стандарт самодостаточен, не всегда ясно, как все стандарты, имеющие отношение к какому-либо вопросу, работают вместе. Поэтому было написано Руководство для инженеров [1]. Эта серия статей написана для того, чтобы сделать информацию в этом Руководстве более доступной.

Были приняты или находятся в процессе принятия стандарты, относящиеся к демонстрации в кинотеатрах изображений при помощи цифровых проекторов. Однако только пять стандартов [1-5] относятся к цветовому кодированию или цветовому воспроизведению в кинотеатре. В настоящей серии статей обсуждаются эти пять связанных с цветом стандартов. Данная, первая в серии, статья объясняет основные принципы разработки кодирующих и декодирующих равенств цифрового прокатного мастера (DCDM), рассматривает аргументы, которые привели к окончательному решению по кодирующему базису, и объясняет причины выбора показателя степени 1/2.6 в кодирующих равенствах.

Статьи фокусируются на цветовом кодировании и декодировании изображений для цифрового кинематографа в соответствии со стандартами SMPTE, рекомендованными практиками и инженерными руководствами. Статья Сильвы [6] и книга Кеннела [7] дают существенно больше информации по полной технологии цифрового кинематографа.

Введение в обработку цвета в цифровом кинематографе

Работа, которая привела к написанию стандартов SMPTE по цветовому кодированию для цифрового кинематографа, проводилась на основе следующих принципов:

(1) Важнейшей целью было определить цветовое кодирование, которое обеспечит отличное качество изображения во всех кинотеатрах. Цветовое качество изображения не должно быть ограничено кодированием. Изображение, получаемое в одном зале, должно в пределах строгих допусков соответствовать изображению, получаемому в другом зале. Это привело к некоторым решениям, создающим технические проблемы для используемых сегодня технологий, и которые могут приводить к увеличению (незначительному) стоимости системы в целом. Было принято решение, что возможность получения от-

личного качества в кинотеатре существенно важнее этих разрешимых проблем.

(2) Кодирование должно быть разработано таким образом, чтобы охватывать такую цветовую гамму, какую могут воспроизводить существующие цифровые проекторы, и, желательно, включать все возможные плёночные цвета. Кроме того, было желание написать стандарт, который позволил бы будущие усовершенствования проекционной технологии реализовать в цифровом кинематографическом кодировании.

(3) Кодирование не должно быть привязано к какому-либо конкретному устройству или технологии. Сейчас это называется аппаратно-независимым кодированием. Само по себе аппаратно-независимое кодирование не приводит к устойчивому кодированию; однако в совокупности с другими параметрами оно может привести к устойчивому кодированию.

(4) Цветовое кодирование для цифрового кинематографа должно быть относительно простым в применении, чтобы изображения могли обрабатываться и проецироваться в реальном времени.

(5) Цветовое кодирование, стандартизованное SMPTE, относится только к Прокатному Цифровому Мастеру (DCDM). Была серьёзная дискуссия по кодированию Исходного Цифрового Мастера (DSM), предстоящего Прокатному Мастеру. Однако, поскольку DSM делают в лаборатории постпроизводства, лаборатория может создавать этот Исходный Мастер в том формате файла и цветовом пространстве, в котором она хочет. Производство Прокатного Мастера из Исходного Мастера зависит от вида Исходного Мастера. Последняя статья данной серии опишет различные пути создания DSM и как конвертировать каждый из этих DSM в соответствующий DCDM. Простейшее описание этого преобразования выглядит следующим образом:

DSM => Преобразование 1 => XYZ => Преобразование 2 => X'Y'Z' => Проекция изображения,

где: Преобразование 1 необходимо для конвертации DSM в значения цветовых координат XYZ, а Преобразование 2 задаётся равенствами 1–3. Преобразование 1 зависит от того, какое кодирование было использовано в DSM. В некоторых случаях будет лучше иметь прямое Преобразование 1 из кодирования DSM в X'Y'Z', а не в XYZ с последующим Преобразованием 2. Это вопросы реализации, и у каждого будет свой способ применения различных преобразований. Таблица 1 прослеживает шаги от съёмки изображения на негативную киноплёнку до проекции окончательного изображения в кинотеатре. В двух процессах, показанных в Таблице 1, предполага-

ется, что проецируемое плёночное изображение является желаемым изображением, а проецируемое цифровое изображение насколько возможно соответствует плёночному. В этой таблице преобразование, эмулирующее позитивную плёнку, есть Преобразование 1 из диаграммы. Это преобразование, обычно реализуемое таблично, эмулирует шаги традиционного плёночного процесса, представляющие запись, контратипирование и печать фильмокопий. XYZ – это те значения XYZ, которые представляют изображение на экране при проекции фильмокопии. Преобразование из XYZ в X'Y'Z' осуществляется с использованием равенств 1–3.

Таблица 1. Сравнение процессов преобразования изображений от негатива на киноплёнке до окончательного изображения, проецируемого с фильмокопии или с цифрового проектора

Негативная киноплёнка	Негативная киноплёнка
Сканирование негатива	Сканирование негатива
Кодированные значения сканера	Кодированные значения сканера
Запись	Преобразование, эмулирующее позитивную плёнку
Контратипная плёнка	
Позитивная плёнка	XYZ
	X'Y'Z'
Проекция	Проекция
Изображение на экране	Изображение на экране

Цифровой кинематограф, известный также как D-Cinema, основан на технологии определения изображения набором кодированных значений. В цветовом кодировании, выбранном SMPTE, для определения любого одного цвета требуется три и только три кодированных значения. Кроме этого, набор трёх кодированных значений определяет один и только один цвет. Пять документов SMPTE [1–5] определяют эту цветовую систему. Настоящая серия статей объясняет, как использовать эти документы, чтобы применить эту цветовую систему.

Основная задача состоит в определении такой системы, в которой изображение, проецируемое в любом кинотеатре любым проектором, будет одинаковым в пределах разумных допусков. Для достижения этой цели необходимо определить три элемента системы: (1) связь кодированных значений и кодированного цвета, (2) измерение света, отражаемого от экрана, и (3) нормативы и допуски на каждый измеряемый параметр. Указанные документы SMPTE и настоящая серия статей объясняют каждый из этих элементов, и как собрать их вместе в работающую систему.

Цветовое кодирование для системы цифрового кинематографа основано на определении изображения, которое должно быть воспроизведено на экране. Поэтому документы SMPTE стандартизуют связь между кодированными значениями и желаемыми цветами; однако они не обсуждают вопрос, как определить желаемые цвета. Понятно, что при обычном производстве фильма изображе-

ние должно быть создано до того, как будут закодированы цвета цифрового изображения. Для определения этого исходного изображения используется DSM, поскольку DSM может быть источником многих различных цифровых изображений: изображений цифрового кино, изображений HDTV, изображений DVD и т.д. Есть три причины, почему DSM до сих пор не определено никакими документами SMPTE: (1) DSM предшествует изображению цифрового кинематографа; (2) метод, которым создаются изображения в DSM, определяет автор; (3) DSM может быть определено множеством различных полезных способов.

В значительной степени кодирование и декодирование изображений цифрового кинематографа вращается вокруг эталонного проектора. SMPTE 431-2 устанавливает: «Эталонный проектор – практическое устройство». Не существует физического эталонного проектора, как такового. Но это – устройство, определённое его характеристиками и возможностями, а не технологией изготовления. Сомнительно, что существует какое-либо физическое устройство, в точности соответствующее характеристикам, определённым для эталонного проектора. Однако есть много физических цифровых проекторов, которые соответствуют характеристикам эталонного проектора в границах приемлемых отклонений от нормативных значений. Поэтому использование термина «эталонный проектор» относится к двум различным устройствам: (1) теоретическому устройству, строго определённым характеристиками, данными в различных стандартах; и (2) любому физическому устройству, которое отвечает характеристикам, определённым для теоретического эталонного проектора с заданными допусками.

Существует много технических решений проблемы конструирования проектора, имеющего возможности, требуемые для эталонного проектора. Возможности эталонного проектора – это минимальные возможности любого физического проектора; однако это не значит, что эти возможности ограничивающие. Физический проектор может иметь возможности, превышающие возможности эталонного проектора. Поэтому технологии, используемые для изготовления физического проектора, не обсуждаются в каких-либо документах SMPTE; описаны только возможности. Должны существовать единые методы, при помощи которых может быть измерен свет, отражённый от экрана, чтобы знать, соответствуют ли возможности произвольного физического проектора эталонному проектору. Кроме того, понятно, что поскольку физические устройства всегда отличаются между собой, и с течением времени меняются параметры для одного и того же устройства, должны быть разумные допуски, в пределах которых могут работать все устройства, и которые обеспечат получение визуально одинаковых изображений во всех кинотеатрах.

Любая тройка чисел, например, RGB или XYZ, в данной серии статей всегда расположена в том порядке, в котором идут переменные. Например, если тройка называется RGB, и числа (100 200 300) представляют её значения, то 100 представляет значение R, 200 – G и 300 – B. Матрицы,

которые работают со значениями RGB или XYZ, определены для такого же порядка переменных. Причина подчёркивания этого очевидного соглашения состоит в том, что некоторые устройства не следуют порядку RGB. Это может вызвать проблемы при определении матриц преобразования из RGB в XYZ и из XYZ в RGB. Поэтому, когда матрица вводится в проектор (или иное устройство), пользователь должен быть уверен, что матрица и устройство используют переменные в одинаковом порядке.

Равенства цветового кодирования DCDM

SMPTE 428-1[2] определяет Равенства цветового кодирования DCDM. Использование этих равенств означает, что изображение должно быть определено в значениях цветовых координат CIE XYZ [8–10]. Эти значения представляют колориметрию над уровнем чёрного кинозала и должны вычисляться с нормирующей константой, которая устанавливает значение координаты Y белого, равным 1.

При такой спецификации цвета следующие равенства определяют функцию кодирующего преобразования, где X,Y,Z – это значения координат над уровнем чёрного кинозала:

$$X' = \text{INT} \left[4095 * \left(\frac{L * X}{52.37} \right)^{\frac{1}{2.6}} \right] \quad 1)$$

$$Y' = \text{INT} \left[4095 * \left(\frac{L * Y}{52.37} \right)^{\frac{1}{2.6}} \right] \quad 2)$$

$$Z' = \text{INT} \left[4095 * \left(\frac{L * Z}{52.37} \right)^{\frac{1}{2.6}} \right] \quad 3)$$

где оператор INT возвращает значение дробной части 0, если дробная часть находится в диапазоне от 0 до 0.4999..., и +1 для дробной части от 0.5 до 0.999..., т.е. округляет вниз при дробной части меньше 0.5 и округляет вверх при дробной части больше либо равной 0.5. L – это яркость белого, равная 48 кд/м², как определено SMPTE 431-1[3]. В некоторых документах SMPTE по цифровому кинематографу используются символы CVx, CVy и CVz, в других X', Y' и Z'. Последние будут использоваться в данном документе. Важно помнить, что эти закодированные значения координат XYZ являются значениями, измеренными от экрана над значениями уровня чёрного. Из этих равенств и из 12-битного кодирования для значений X'Y'Z' следует, что максимальные значения XYZ, которые могут быть закодированы, равны (1.091 1.091 1.091).

Равенства цветового декодирования DCDM

SMPTE 431-2 определяет равенства цветового декодирования DCDM. Они обратны кодирующим равенствам:

$$X = \left(\frac{52.37}{L} \right) * \left(\frac{X'}{4095} \right)^{2.6} \quad 4)$$

$$Y = \left(\frac{52.37}{L} \right) * \left(\frac{Y'}{4095} \right)^{2.6} \quad 5)$$

$$Z = \left(\frac{52.37}{L} \right) * \left(\frac{Z'}{4095} \right)^{2.6} \quad 6)$$

В таблице 2 приведены некоторые значения X', Y', Z' и соответствующие X, Y, Z, рассчитанные из равенств 1–6.

Таблица 2. Примеры значений XYZ и X'Y'Z', связанных равенствами 1–6

X, Y, Z	X', Y', Z'
0.0000	0
0.0001	100
0.0004	200
0.0046	500
0.0279	1000
0.1693	2000
0.4858	3000
1.0000	3960
1.0910	4095

Объяснение кодирования и декодирования колориметрии цифрового кинематографа

Базисом системы цветового кодирования DCDM является система цветовых координат CIE XYZ. Значения в этой системе координат линейно связаны со светом; однако поскольку система человеческого зрения реагирует на свет не линейно, будет более эффективно кодировать значения XYZ, а не использовать их непосредственно. Эти кодированные значения XYZ обозначаются символами X'Y'Z' в документах SMPTE, относящихся к цифровому кинематографу.

Вопрос кодирования чёрного был предметом серьёзного обсуждения. Окончательное решение основано на опыте кинотеатральной проекции фильмокопий. Определённое количество света отражается от экрана кинотеатра даже при выключенном проекторе. Этот свет, отражаемый от экрана при включённом аварийном освещении и выключенном проекторе, называется *окружающим светом кинозала*. Когда цифровой проектор включён и находится в рабочем состоянии, некоторая часть света попадает на экран от проектора, даже при подаче на него кодированных значений [0 0 0]. Этот свет, отражаемый от экрана, когда кинозал находится полностью в рабочем состоянии, называется «чёрным светом кинозала». Заметим, что уровень чёрного должен быть таким же (такого, видимо, никогда не бывает, но теоретически возможно) или выше *окружающего света*.

Когда фильм проецируется в кинотеатре, это в принципе тот же фильм, который проецируется в любом другом кинотеатре, независимо от уровня чёрного. Никаких

настроек фильмокопии не делается в зависимости от уровня чёрного. Это означает, что практически то, что зритель видит в одном кинотеатре, слабо отличается от того, что он видит в другом, если различия обусловлены разницей уровней чёрного. Было бы невозможно изготавливать фильмокопии, корректируемые под разные уровни чёрного кинозалов. Кроме этого, такая стратегия обеспечивает лучшее совокупное качество изображения, чем если бы каждая фильмокопия корректировалась под каждый уровень чёрного.

Те же причины использованы при определении цветового кодирования DCDM. Под уровень чёрного не делается никакой коррекции. Это означает, что вид проецируемого изображения будет изменяться от кинотеатра к кинотеатру, если разные кинотеатры имеют разный уровень чёрного. Это означает также, что одна и та же цифровая копия может быть отправлена в различные кинотеатры, и система в каждом кинотеатре может использовать эту копию без дополнительных настроек кодированных значений на уровень чёрного. Следовательно, значения XYZ и X'Y'Z' определяют количество света, отражаемого от экрана, над уровнем чёрного, а не абсолютное количество света, отражаемое от экрана. Можно, однако, принять какой-то уровень чёрного и по кодированным значениям X'Y'Z' рассчитать абсолютное количество света, отражаемого от экрана. SMPTE 431-2 [4] полагает уровень чёрного, равным 0.024 кд/м², и это значение включено в табличные значения Y этой Рекомендованной Практики.

Расположение кодирующего цветового базиса

Существует много способов отображения цветовой гаммы; однако наиболее распространенным методом, используемым при обсуждении базисных цветов для цифрового кинематографа, является CIE xy диаграмма цветности. Эта диаграмма и её преобразование – CIE u'v' диаграмма цветности – использовались обычно при описании трёхцветных аддитивных систем, поскольку все цветности, которые могут быть воспроизведены такой системой, попадают в треугольник, образованный отрезками, соединяющими точки цветности базисных цветов. Кроме того, все цветности, лежащие вне этого треугольника, не могут быть воспроизведены этой системой. Недостатком диаграммы цветности xy является то, что это двумерная диаграмма, и третье измерение, яркость, не отображается. Трёхмерная форма цветовой гаммы трёхцветных аддитивных устройств отображения в этом xy пространстве является многогранным телом, а не призмой. Очень полезно использовать CIE xy диаграмму цветности для сравнения цветовых гамм различных систем, что и было сделано при выборе кодирующего базиса.

Было много предложений по кодирующему базису для DCDM. На рисунке 1 показаны некоторые из серьёзно рассматривавшихся наборов. Ниже будут показаны достоинства и недостатки каждого из этих предложений.

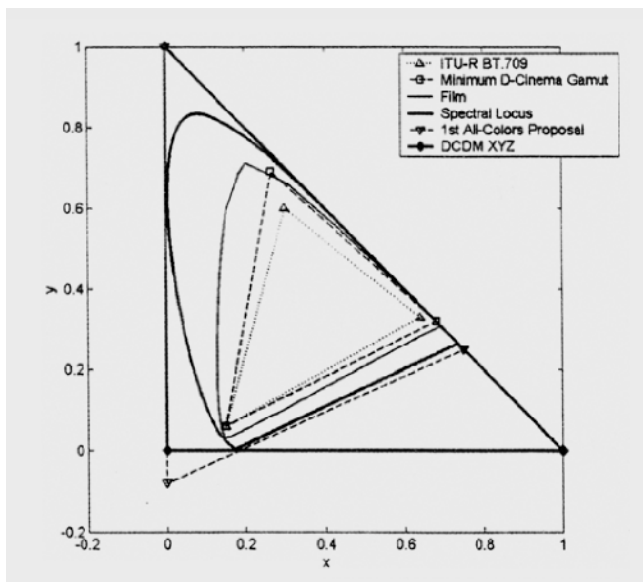


Рис. 1. Базисы, которые рассматривались для кодирования цветов в DCDM

Достоинство базиса ITU-R BT.709-5 [11] (из оптоэлектронной таблицы в части 1 этих Рекомендаций), показанного на рисунке 1 как треугольник ITU-R BT.709, состоит в том, что преобразование из DCDM в базис ITU-R BT.709 относительно легко осуществить, и известно, что компрессия этих кодированных значений хорошо работает. Недостаток в том, что он представляет наименьшую из рассматривавшихся образцов гамму оттенков цвета. Фактически эта цветовая гамма меньше гаммы коммерчески доступных кинематографических проекторов, имевшихся ко времени начала дискуссии по этим стандартам в 2000 году.

Минимальный базис цифрового кинематографа на рисунке 1 представляет базис существовавшего в 2000 году DLP кинопроектора, использующего ксеноновый свет со светофильтрами. Достоинством этой цветовой гаммы является то, что это базис реального проектора и поэтому преобразование кодированных значений DCDM во внутренние значения проектора очень простое. Но у этого базиса было два недостатка. Во-первых, было желание закодировать в DCDM все плёночные цвета, некоторые из которых лежат вне цветовой гаммы этого базиса. Во-вторых, любое развитие в расширении цветовой гаммы проекторов, такое как использование лазеров, не будет видно вследствие этой ограниченной цветовой гаммы.

Было несколько предложений, не показанных на рисунке 1, которые располагали базисные цвета снаружи треугольника минимального базиса цифрового кинематографа, но не покрывали всего спектрального локуса. Достоинством этих базисов было то, что они покрывали (или почти покрывали) плёночную гамму и возможный лазерный базис. Недостаток – один, иногда два базисных цвета оказывались вне спектрального локуса; эффективность кодирования, определяемая как отношение коди-

рованных значений, представляющих реальные цвета, ко всем возможным кодированным значениям, была меньше 100%; и при дополнительном усложнении не включали все возможные цвета.

Первый Все-Цветный комплект базисных цветов на рисунке 1 представляет попытку определить базис, охватывающий спектральный locus. Очевидным достоинством этого комплекта является охват спектрального локуса и, следовательно, гаммы любого реального проектора. Недостатки в том, что все три базисных цвета выходят за границы локуса, и эффективность такого комплекта была существенно ниже, чем у всех ранее перечисленных. Однако тот факт, что этот базис включает спектральный locus и поэтому все возможные цвета, был для многих очень привлекателен, и это предложение рассматривалось довольно долго. Окончательное решение принималось между этим комплектом цветов и базисом XYZ, который будет рассмотрен ниже.

Базис DCDM XYZ, показанный на рисунке 1, устанавливает для базисных цветов те же координаты цветности, что и система CIE XYZ. Хотя эта система математически точно такая же, как все предыдущие, которые обычно используют буквы RGB для описания базисных цветов, в этом предложении используются буквы XYZ, чтобы указать, что кодирующим базисом является система CIE XYZ. Базис DCDM XYZ является логическим расширением всех ранее предложенных базисов. Он имеет ряд преимуществ; он включает спектральный locus и, следовательно, все возможные цвета, которые можно видеть и которые должны быть закодированы. Этот базис выделяет яркость в канал Y, соответствующий G каналу, а каналы X и Z определяют только цвет, но не яркость. Недостатком является то, что все базисные цвета мнимые, т.е. лежат вне спектрального локуса, что базис довольно неэффективен (однако в следующей статье будет показано, что эффективность не является критическим параметром) и что было недостаточно практического опыта работы с изображениями, кодированными в XYZ, в отличие от RGB.

После того, как был предложен базис CIE XYZ, были проведены эксперименты, которые показали, что можно сжимать XYZ изображения, и компрессия в этом цветовом пространстве, по крайней мере, не менее эффективна, чем RGB. Кроме того, было установлено, что в терминах преобразования из одного базиса в другой с изображениями XYZ так же легко работать, как с изображениями RGB. Поэтому, в конце концов, было решено использовать для DCDM базис XYZ.

Причины выбора константы 2.6

Один из разделов, интенсивно изучаемых в области визуального восприятия [12], отвечает на вопрос: «Каково минимально различимое изменение яркости?» Цветовые изменения менее заметны, чем яркостные, поэтому рассматривались изменения яркости с использованием чёрно-белых изображений. Это может показаться про-

стым вопросом, однако слишком много переменных могут влиять на порог видимости образца. Например, тип используемого изображения и средняя яркость изображения изменяют результат. Было установлено, что глаз плохо регистрирует абсолютное изменение яркости, но отлично определяет относительное изменение яркости, т.е. отношение изменения яркости к средней яркости.

В экспериментах, разработанных для ответа на вышеупомянутый вопрос, принято использовать синусоидальные волны и анализировать отношение реакции наблюдателя к модуляции m , определяемой равенством:

$$m = \frac{L_{high} - L_{low}}{L_{high} + L_{low}} = \frac{\Delta L}{2 * L_{average}} \quad 7)$$

где: L_{high} и L_{low} – максимальная и минимальная яркости синусоидальной волны; ΔL – разность L_{high} и L_{low} , $L_{average}$ – среднее арифметическое L_{high} и L_{low} . В любой схеме кодирования, если её модуляция, рассчитанная по изменению кодированной яркости на 1 кодовое значение, меньше Порога Модуляции Человеческого Зрения (HVMТ), тогда эта схема кодирования способна кодировать всю информацию, которую способен увидеть человек, и не внесёт в изображение артефактов, вызванных кодированием. Бартен [12] вывел уравнение, предсказывающее HVMТ синусоидальной волны как функцию большого количества переменных. Это выражение было использовано для сравнения HVMТ и модуляции всех предложенных схем кодирования. Зависимость этой HVMТ от яркости представлена на рисунке 2. Диапазон интересующих нас яркостей при кинотеатральной проекции составляет приблизительно от 50 кд/м² до 0.01 кд/м², т.е. контраст 5000:1, называемый также последовательным контрастом. Никакое простое выражение не описывает эту кривую.

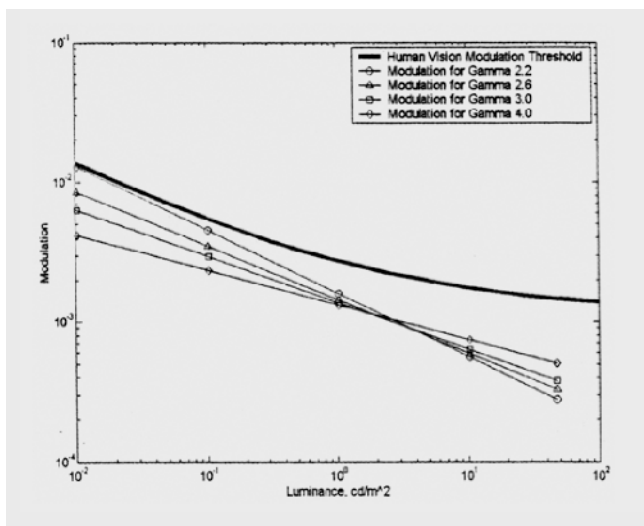


Рис. 2. Зависимость HVMТ от яркости

Кривая HVMТ на рисунке 2 представляет минимальную модуляцию, которая может быть различима при идеальных условиях и с образцами, к которым человек наиболее чувствителен. Минимальная модуляция соот-

ветствует максимальному количеству информации, которое необходимо кодировать. Человек наиболее чувствителен к синусоидальным волнам с частотами между 1 и 5 периодами на градус в зависимости от средней яркости волн, и когда кроме этого поле зрения достаточно широкое, чтобы включать большое количество синусоидальных волн (поле зрения с 15 или более синусоидальными волнами). Для менее требовательных образцов порог модуляции повышается. Например, для одного края, что имеет место в артефакте, известном как оконтуривание, порог модуляции примерно в десять раз больше HVMТ, показанной на рисунке 2. Кривая HVMТ была использована в качестве основы для принятия решений по видимой информации, которая может быть закодирована.

Было много предложений по общей форме уравнений кодирования и декодирования. Эффективность оценивалась по степени близости к HVMТ, показанной на рисунке 2. Было решено использовать кодирующее равенство в виде:

$$CV = CV_{max} * \left(\frac{L}{P}\right)^{\frac{1}{m}} \quad 8)$$

и декодирующее равенство в виде:

$$L = P * \left(\frac{CV}{CV_{max}}\right)^n \quad 9)$$

В этих равенствах P – это нормирующая константа, а CV_{max} равно:

$$CV_{max} = 2^b - 1 \quad 10)$$

где b – глубина дискретизации при кодировании.

В общем случае показатель степени при кодировании равен $1/m$, при декодировании – n . В некоторых системах m и n не равны. Однако в DCDM кодировании, где окончательный цвет «запечён» в кодированных значениях DCDM, показатели степени кодирующих и декодирующих равенств должны быть обратными величинами. Это означает, что m должно быть равно n и обозначается греческой буквой γ . Таким образом, показатель степени при кодировании равен $1/\gamma$, при декодировании – γ .

Когда было решено использовать равенства 8 и 9, следующим шагом необходимо было определить значение гаммы. Выбор гаммы зависит от выбора P и CV_{max} . Вторая статья настоящей серии [13] объясняет причины выбора значений 4095 для CV_{max} и 52.37 для P . Сейчас примем эти значения в качестве лучшего компромисса. Из равенства 2 можно посчитать, что кодированное значение Y' , кодирующее максимальную яркость 48 кд/м², равно 3960. Значение 3960 зависит от значения гаммы. Поэтому в дальнейшем объяснении выбора для гаммы значения 2.6, CV_{max} считается равным 4095, а P изменяется таким образом, чтобы 3960 кодировало 48 кд/м². Тогда общее декодирующее равенство выглядит следующим образом:

$$L = P * \left(\frac{CV}{4095}\right)^{\gamma} \quad 11)$$

Из Равенства 11 значение Р может быть рассчитано для любого значения гаммы. Если в Равенстве 11 определены все параметры для всех кодированных значений от 0 до 4095, можно рассчитать кодированную яркость L. Затем по этим значениям яркости и Равенству 7 можно рассчитать модуляцию для всех единичных изменений кодированных значений. Эти расчёты были проведены для значений гаммы 2.2, 2.6, 3.0 и 4.0. Результаты приведены на рисунке 2, который показывает, что при гамме 2.2 модуляция при малых яркостях лишь немного ниже HVMT. Любая гаммы, меньшая 2.2, окажется выше HVMT при этих малых яркостях. Это устанавливает нижний порог для значения гаммы. С ростом значения гаммы кривая модуляции удаляется от кривой HVMT при малых яркостях и приближается к HVMT при больших. Следовательно, теоретически, можно использовать любое значение гаммы, большее 2.2.

В таблице 3 приведены кодированные значения, соответствующие различным яркостям для различных значений гаммы. Можно видеть, что с ростом гаммы при фиксированном кодированном значении 3960, определяющем яркость 48 кд/м², кодированные значения для любой яркости также возрастают. Наиболее важен диапазон от 0.01 до 48 кд/м², и кодированные значения для 0.01 кд/м² представляют особый интерес. Кодированные значения, меньшие этого значения, в сущности, пропадают, поскольку находятся ниже возможности воспроизведения проектора.

Таблица 3. Коды различных значений яркости для некоторых значений гаммы

Яркость	Значения гаммы			
	2.2	2.6	3.0	4.0
0.01	85	153	237	479
0.1	242	372	510	852
1.0	690	903	1100	1515
10	1967	2190	2370	2695
48	3960	3960	3960	3960

Из данных рисунка 2 и таблицы 3 можно сделать выбор оптимальной гаммы. Очевидно, совершенного значения гаммы нет; каждое значение предлагает компромисс. Согласно таблице 3 гамма, равная 4.0, отводит слишком много, почти 500, кодированных значений для значений яркости, которые никогда не будут использованы. Поэтому значение 4.0 можно отбросить. Значение гаммы 3.0 с 237 кодированными значениями, которые никогда не будут использованы, представляется верхним пределом значений гаммы. Как показано на рисунке 2, гамма, меньше 2.2, пересекает кривую HVMT. Таким образом, диапазон разумных значений гаммы лежит между 2.2 и 3.0. Выбор делается между эффективным использованием кодированных значений и большим или меньшим

количеством кодированных значений в области высоких или низких яркостей. В конце концов, была выбрана гамма 2.6. Оглядываясь назад, мы видим, что близкие к 2.6 значения гаммы ничуть не хуже; однако в то время это значение казалось хорошим компромиссом и было принято. Тот факт, что многие полнометражные фильмы были закодированы и демонстрировались с гаммой 2.6 без каких-либо проблем, связанных со значением гаммы, подтверждает этот выбор.

Важно отметить, что выбор значения 2.6 никоим образом не связан с физикой или электроникой какого-либо устройства отображения. Решение было принято на основе возможности кодирования значений яркости при модуляции, которая не будет ограничивать качество кодируемых изображений. Хотя речь шла о последовательном контрасте 5000:1, значение гаммы 2.6 не станет фактором, ограничивающим качество изображения, даже если будущие проекторы достигнут последовательного контраста 1 000 000:1.

Выражение признательности

Данная статья основана на информации Инженерного Справочника SMPTE 432-1 «Обработка цвета для цифрового кинематографа», редактором которого был автор. Автор благодарит всех, внёсших вклад в создание Инженерного Справочника, за полезные и многочисленные предложения, направленные на его улучшение. Автор благодарит также фирму Eastman Kodak за поддержку данной работы. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. SMPTE 432-1. Color Processing for D-Cinema // www.smpte.org.
2. SMPTE 428-1. Digital Cinema Distribution Master (DCDM) — Image Characteristics // www.smpte.org.
3. SMPTE 431-1. D-Cinema Exhibition Screen Luminance Level, Chromaticity, and Uniformity // www.smpte.org.
4. SMPTE 431-2. Reference Projector and Environment for Display of DCDM in Review Rooms and Theaters // www.smpte.org.
5. SMPTE 431-3. Projection Image Measurements // www.smpte.org.
6. Silva J. Digital Cinema Image Representation Signal Flow // SMPTE Mot. Imag. J., 115: 137-152, April 2006.
7. Kennel G. Color and Mastering for Digital Cinema, Focal Press: New York, NY, 2007.
8. CIE Publication 15.2. Colorimetry, 2nd Edition, 1986.
9. CIE Publication 15:2004. Colorimetry, 3rd Edition, 2004.
10. CIE Publication S002-1986, Or. Colorimetric Observers, 1986. This has also been published as CIE/ISO 10527:1991.
11. Recommendation ITU-R BT.709-5. Parameter Values for the HDTV Standards for Production and International Programme Exchange.
12. Barten P. G. J. Contrast Sensitivity of the Human Eye and Its Effects on Image Quality, SPIE Optical Engineering Press: Bellingham, WA, 1999.
13. Maier T. Color Processing for Digital Cinema. 2. Explanation of the Constants 4095 and 52.37, the White Points, and the Black // SMPTE Mot. Imag. J., published in this issue.



ОБРАБОТКА ЦВЕТА ДЛЯ ЦИФРОВОГО КИНЕМАТОГРАФА 2:

Объяснение констант 4095 и 52.37,
Белых Точек и Чёрного



Thomas O. Maier

Color Processing for Digital Cinema 2: Explanation of the Constants 4095 and 52.37, the White Points, and the Black

Перевод В. Сычёва, к.т.н., ОАО «НИКФИ»

Эта серия статей по цветовой обработке для цифрового кинематографа основана на Руководстве для инженеров SMPTE 432-1. Комитет DC28 надеется, что информация этого руководства будет более доступна, если опубликовать её в виде серии журнальных статей. В данной, второй в серии, статье описаны причины выбора констант 4095 и 52.37 в равенствах кодирования и декодирования Прокатного Цифрового Мастера (DCDM) и обсуждаются белая и чёрная точки.

■ Все стандарты, которые необходимы для кодирования и декодирования цветовой информации для цифрового кинематографа, уже опубликованы. Любой стандарт описывает только результат окончательного консенсуса людей, вовлечённых в написание этого стандарта, и не включает причины выбора того, что в него входит. Кроме того, поскольку каждый стандарт самодостаточен, не всегда ясно, как все стандарты, имеющие отношение к какому-либо вопросу, работают вместе. Поэтому было написано Руководство для инженеров [1]. Эта серия статей написана для того, чтобы сделать информацию в этом Руководстве более доступной.

Были приняты или находятся в процессе принятия стандарты, относящиеся к демонстрации в кинотеатрах изображений при помощи цифровых проекторов. Однако только пять стандартов [1–5] относятся к цветовому кодированию или цветовому воспроизведению в кинотеатре. В настоящей серии статей обсуждаются эти пять связанных с цветом стандартов. Первая в серии статья [6] фокусировалась на кодирующих и декодирующих равенствах, базе кодирования и константе 2.6 в равенствах. Данная, вторая в серии, статья объясняет, почему для кодирующих равенств DCDM выбраны константы 4095 и 52.37 и описывает различные белые и чёрные точки, понимание которых необходимо при подготовке контента для демонстрации цифровым проектором в тёмном кинозале.

Следующие равенства определяют функцию кодирующего преобразования, где X,Y,Z представляют цветовые координаты CIE над уровнем чёрного кинозала.

$$CV_{X'} = \text{INT} \left[4095 * \left(\frac{L * X}{52.37} \right)^{\frac{1}{2.6}} \right] \quad 1)$$

$$CV_{Y'} = \text{INT} \left[4095 * \left(\frac{L * Y}{52.37} \right)^{\frac{1}{2.6}} \right] \quad 2)$$

$$CV_{Z'} = \text{INT} \left[4095 * \left(\frac{L * Z}{52.37} \right)^{\frac{1}{2.6}} \right] \quad 3)$$

где L = 48, поскольку яркость белого принята равной 48 кд/м². Для простоты записи кодированных значений принято использовать X', Y', Z' вместо CV_{X'}, CV_{Y'}, CV_{Z'}. Важно помнить, что эти кодированные координаты цвета XYZ измерены от экрана над координатами чёрного кинозала.

Равенства для декодирования кодированной цветовой информации обратны кодирующим равенствам:

$$X = \left(\frac{52.37}{L} \right) * \left(\frac{X'}{4095} \right)^{2.6} \quad 4)$$

$$Y = \left(\frac{52.37}{L} \right) * \left(\frac{Y'}{4095} \right)^{2.6} \quad 5)$$

$$Z = \left(\frac{52.37}{L} \right) * \left(\frac{Z'}{4095} \right)^{2.6} \quad 6)$$

Причина выбора константы 4095

Кривая пороговой модуляции человеческого зрения HVMT [1,6,7] была использована для выбора общего вида кодирующих и декодирующих равенств и значения гаммы в этих равенствах, как было объяснено в первой статье серии [6]; она использовалась также при определении глубины квантования. Из общей формы декодирующего яркость равенства, яркость L, соответствующая каждому кодированному значению, может быть вычислена:

$$L = P * \left(\frac{CV}{CV_{max}} \right)^{2.6} \tag{7}$$

где CV – любое кодированное значение от 0 до CV_{max}, а CV_{max} задано равенством:

$$CV_{max} = 2^b - 1 \tag{8}$$

где b – глубина квантования. Изначально было использовано значение P, равное 48 кд/м², поскольку было решено, что яркость белого будет 48 кд/м². Выбор глубины квантования b слабо зависит от значения P, поэтому, даже если P в дальнейшем изменится, решение по глубине квантования сохранится.

Для кодирования рассматривались только чётные количества бит. При этом относительно легко было посчитать яркость для каждого кодированного значения при конкретной глубине квантования. Минимальная ΔL для любой глубины квантования – это изменение яркости при изменении кодированного значения на 1. Модуляция m при заданной глубине квантования может быть рассчитана для всех значений яркости из равенства:

$$m = \frac{\Delta L}{2 * L_{average}} \tag{9}$$

где ΔL – разность яркостей для двух последовательных кодированных значений,

L_{average} – среднее арифметическое значение этих яркостей.

На рис. 1 показаны рассчитанные (с использованием равенства Бартена [7]) кривые HVMT для наиболее требовательных образцов и кривые модуляции для 8-, 10-, 12- и 14-битного кодирования. Это самая низкая HVMT, которая может быть рассчитана для просмотра изображений в тёмном кинозале. На рис. 1 образцы правее и выше кривой HVMT заметны, левее и ниже – незаметны. Эта кривая была рассчитана для наиболее требовательных синусоидальных образцов и представляет, таким образом, крайний случай. Целый ряд факторов может сделать образец невидимым, даже если он лежит выше кривой HVMT. Например, шумы или зернистость изображения могут сдвинуть кривую вверх и вправо. Изображение, сгенерированное компьютером, может не иметь шумов и представляет, таким образом, этот крайний случай. На рис. 1 видно, что 10-битное кодирование (или ниже) содержит слишком мало бит, а 12-битное (или выше) содержит больше бит, чем необходимо, чтобы избежать каких-либо потерь информа-

ции или артефактов изображения, связанных с глубокой квантования.

Рис. 1 основан только на расчётах. Конечно, за кривой HVMT стоят тщательные эксперименты; однако эта кривая зависит от многих переменных, и то, что было рассчитано и использовалось при разработке кодирования DCDM, является ограниченным частным случаем. Трудно было принять решение по 12-битному кодированию без подтверждающих экспериментов в кинотеатральных условиях с цифровой кинопроекцией. Поэтому был разработан и проведён эксперимент, чтобы определить, как видит человек образцы изображения, кодированные с глубиной 10 бит, в сравнении с образцами, кодированными с глубиной 12 бит. Эти результаты приведены ниже.

С использованием цифрового проектора на экран в тёмном кинозале проецировались образцы квадратных волн. Квадратные волны проецировались при различной средней яркости и с различной модуляцией. Зрители сидели на различном расстоянии от экрана и определяли ориентацию квадратных волн, которые были ориентированы горизонтально или вертикально. На основе анализа зрительских ответов был определён порог модуляции для каждого зрителя. Зрители были набраны из членов комиссии SMPTE DC28, работников студий, кинематографистов и нескольких студентов киношколы. Результаты этих экспериментов очень хорошо согласовывались с результатами рассчитанными, как показано на рис. 2.

На рис. 2 расчётный порог изменяется как функция расстояния вследствие переменного поля зрения и переменной частоты квадратных волн, видимых зрителем. Даже хотя дальние от экрана зрители стабильно имели порог модуляции, меньший расчётного, результаты находятся в прекрасном согласии с расчётным значением. Это серьёзно подтверждает справедливость использования кривых HVMT для определения глубины квантования, необходимой в DCDM кодировании.

Результаты на рис. 2 представляют усреднение по группам зрителей; однако они не дают какой-либо информации по распределению результатов вокруг средних значений. В таблице 1 показаны проценты зрителей, правильно определивших ориентацию квадратных волн с 50% достоверностью в зависимости от яркости и глубины квантования. Это показатель процента людей, которые увидят в изображении единичное изменение кодированного значения.

Таблица 1. Процент зрителей, правильно идентифицировавших ориентацию квадратных волн при DCDM кодировании, использующем 10, 11 и 12 бит

Яркость кд/м ²	Глубина квантования		
	10 бит	11 бит	12 бит
0.279	80%	47%	4%
3.02	92%	46%	9%
33.8	62%	4%	4%

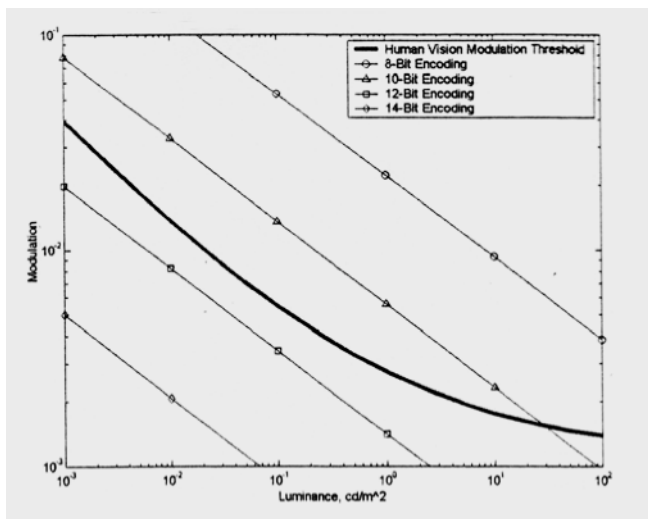


Рис. 1. Видимость при 8-, 10-, 12- и 14-битном кодировании

Таблица 1 показывает, что при 10- или 11-битном кодировании заметное количество зрителей могут увидеть квадратные волны, а при 12-битном кодировании их число весьма незначительно. Видимость квадратных волн – это показатель видимости информации в изображении. Задача состояла в том, чтобы единичное изменение кода DCDM кодировало немного меньше информации, чем способен увидеть человек. Если зритель не может видеть единичного изменения кодированного значения, в изображении не будет артефактов, обусловленных глубиной квантования при кодировании.

Таким образом, и расчёты и эксперимент, проведённый в кинозале с цифровым проектором, показали, что для кодирования всей информации, которую способен увидеть человек без появления артефактов оконтуривания, необходимо 12 бит. На основании этих результатов для DCDM было определено 12 бит на канал. Из равенства 8 при 12-битном кодировании получаем $CV_{max} = 4095$.

Приведённые выше расчёты и эксперимент показывают, что для кодирования канала яркости необходимо 12 бит. Содержится ли информация о яркости в канале Y', как в кодировании DCDM, или в трёх каналах RGB, нейтральная шкала должна кодироваться 12 битами. В дискуссиях по кодированию цветового базиса особое внимание обращалось на эффективность кодирования, которая зависит от выбора базисных цветов. Кодирование X'Y'Z' особенно неэффективно, т.е. очень много комбинаций X'Y'Z' лежат вне спектрального локуса и вне любого реального базиса.

Сейчас ясно, что дискуссия по эффективности кодирования была бессмысленной, поскольку для кодирования нейтральной шкалы необходимо 12 бит. Лучшие оценки количества цветов, которые может различить человек, дают от 2 до 10 миллионов. 12-битное кодирование позволяет кодировать приблизительно 64 миллиарда цветов. Следовательно, при 12-битной системе кодирования эффективность составляет в лучшем слу-

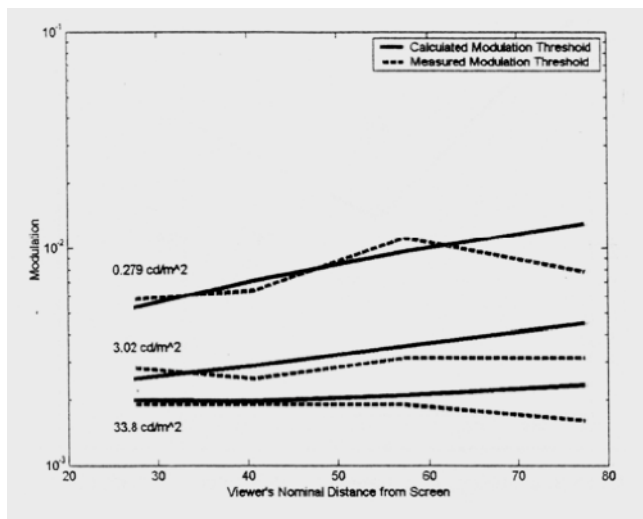


Рис. 2. Сравнение порогов модуляции, определённых в кинозале и рассчитанных

чае 0.003%. Если 12-битного кодирования нейтральной шкалы достаточно для кодирования всей информации о яркости, которую способен увидеть человек, то вдоль нейтральной шкалы достаточно всего 4096 кодированных яркостей. Понятно, что должны существовать более эффективные алгоритмы кодирования, которые позволили бы использовать меньшую глубину квантования. Однако, поскольку желательно иметь RGB тип кодирования с равными (или приблизительно равными) кодированными значениями RGB вдоль нейтральной шкалы, эти алгоритмы с меньшей глубиной квантования были отвергнуты.

Причины выбора константы 52.37

Из равенств 1–6 может показаться, что константой, нормирующей переменные XYZ, должна быть яркость белого 48 кд/м², поэтому значение 52.37 в равенствах может показаться несколько странным. Стандарты цифрового кинематографа SMPTE задают максимальную яркость 48 кд/м², а нормирующую константу 52.37, поэтому максимальное допустимое значение Y' равно 3960. Однако, поскольку на значения X' и Z' ограничений нет, их максимальные значения равны 4095. Некоторые приложения или оборудование, вследствие резервирования кодированных значений, могут ограничить максимум X' и Z' меньшими, чем 4095, значениями; однако остаётся причина допустить возможность для X' и Z' иметь значения большие, чем Y'. Причина использования 52.37 состоит в том, что цветовая гамма кодируемого пространства возрастает с ростом этого значения относительно 48. В частности, есть много цветовых температур вдоль линии D-источников CIE на диаграмме цветности, которые могут быть закодированы при максимальной яркости 48 кд/м². В результате есть много белых точек, на которые можно настроить проектор, если кто-то пожелает иметь отличную от эталонного проектора белую точку. Следующие расчёты и графики пояснят это.

Если бы в равенствах 1–6 использовалась нормирующая константа 48.00 вместо 52.37, яркость 48 кд/м² кодировалась бы значением $Y' = 4095$. Белая точка, которая будет обсуждаться в следующей части, определяется как точка, имеющая одинаковые кодированные значения $X'Y'Z'$, и максимальные значения [4095 4095 4095]. Нормированные значения XYZ, соответствующие этому цвету, равны [1 1 1]. Координаты цветности хуz, соответствующие этому цвету, равны [0.3333 0.3333 0.3333]. Рис. 3–5 показывают координаты цветности, которые могут быть закодированы при 48 кд/м². Одна из границ кодируемой цветовой гаммы при максимальной яркости и в направлении от белой точки к жёлтому (максимальные значения X и Y) определяется набором значений [4095 4095 B], где B меньше 4095 (синяя линия на рисунках). Аналогично, другая граница кодируемой цветовой гаммы при максимальной яркости и в направлении от белой точки к голубому (максимальные значения Y и Z) определяется набором значений [R 4095 4095], где R меньше 4095 (красная линия на рисунках). На рис. 3 показаны максимальные яркости, которые могут быть закодированы с нормирующей константой 48.00. На рис. 4 тот же график показан в увеличенном масштабе, так чтобы более ясно показать зону вокруг наиболее распространённых белых точек. На этих рисунках область, которая может быть закодирована реальными цветами, находится над красной и синей линиями и под чёрной линией. Таким образом, можно видеть, что с этой нормирующей константой равноэнергетическая точка D55 и белая точка эталонного проектора могут быть закодированы, а D61 и D65 – не могут.

Чтобы обеспечить запас для возможных изменений белой точки, коэффициент нормирования был изменён таким образом, чтобы обеспечить кодирование D65 при максимальной яркости 48 кд/м². Использование равенств, аналогичных 1–3, с переменной вместо 52.37 в качестве нормирующей константы, 12-битным кодированием, ограничением максимальной яркости 48 кд/м² (это означает подстановку $L = 48$ в этих равенствах) и включением D65 в кодируемую цветовую гамму, приводит к нормирующей константе 52.37. С этой нормирующей константой гамма цветов с яркостью 48 кд/м² показана на рис. 5. Из него видно, что константу 52.37 определяет точка D65, а не D55 и не равноэнергетическая точка. Точка, где на рис. 5 сходятся красная и синяя линии, имеет координаты цветности [0.3429 0.3143].

Как показано на рис. 6, использование нормирующей константы 52.37 не оказывает существенного влияния на

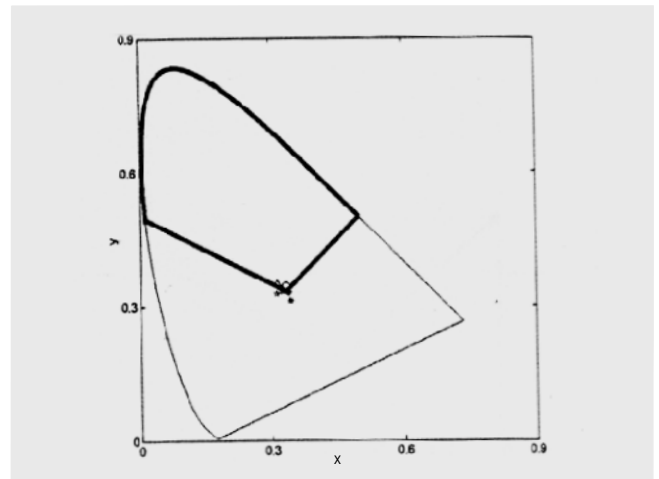


Рис. 3. Граница кодируемой цветовой гаммы при яркости 48 кд/м² с нормирующей константой 48.00

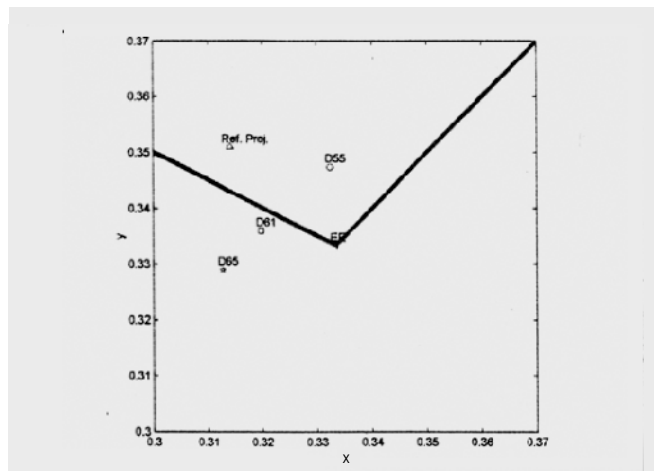


Рис. 4. Граница кодируемой цветовой гаммы при яркости 48 кд/м² с нормирующей константой 48.00 (увеличенный масштаб)

видимость оконтуривания. Модуляция с нормирующей константой 52.37 в кодирующих равенствах не отличается существенно от модуляции с константой 48.00. Поэтому была принята нормирующая константа 52.37.

Как было установлено ранее, использование константы 52.37 позволяет применить больше белых точек для реальных проекторов. В таблице 2 показаны кодированные значения $X'Y'Z'$ и координаты цветности для некоторых источников. Тот факт, что никакие значения $X'Y'Z'$ не превышают 4095, показывает, что все они являются допустимыми белыми точками с точки зрения кодирования контента с яркостью белой точки 48 кд/м².

Таблица 2. Значения хуz и $X'Y'Z'$ для некоторых D-источников

Цвет	x	y	z	X	Y	Z	X'	Y'	Z'
D55	0.3324	0.3474	0.3202	0.9568	1.0000	0.9217	3893	3960	3838
D60	0.3217	0.3378	0.3405	0.9523	1.0000	1.0080	3886	3960	3972
D61	0.3198	0.3360	0.3442	0.9518	1.0000	1.0244	3885	3960	3997
D65	0.3127	0.3290	0.3583	0.9505	1.0000	1.0891	3883	3960	4092

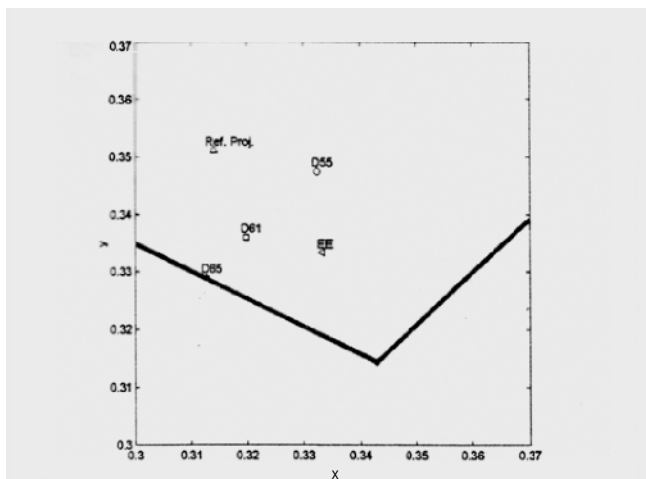


Рис. 5. Граница кодируемой цветовой гаммы при яркости 48 кд/м² с нормирующей константой 52.37

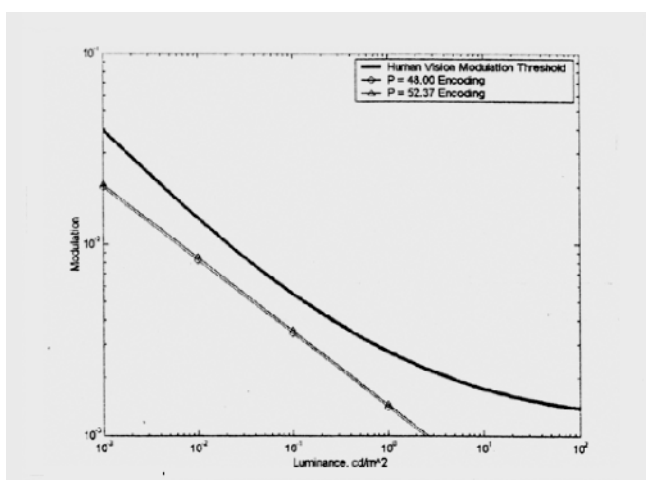


Рис. 6. Кодируемая модуляция для нормирующих констант 48.00 и 52.37 в кодирующих равенствах

Белый: Кодируемый Белый, Установка Белого Проектора и Белый, к которому адаптирован зритель

Белая точка аддитивной отображающей системы определяется обычно как цвет (определяемый координатами цветности и яркостью), получаемый при подаче на систему максимальных принимаемых ею кодированных значений RGB. В некоторых случаях максимальные кодированные значения – не те максимумы, которые определяются глубиной квантования при цифровом кодировании; они несколько меньше этого максимума. Однако принято определять белую точку как получающуюся при равных кодированных значениях RGB. Это будет определением, используемым в настоящей статье для белой точки аддитивной отображающей системы.

Из равенств 4–6, используя максимально допустимые кодированные значения [4095 4095 4095], получаем, что кодируемая белая точка для DCDM системы является равноэнергетической. Нормированные значения XYZ для этой белой точки [1 1 1], а координаты цветности x_{yz} – [0.3333 0.3333 0.3333]. Равноэнергетическая точка обозначена на рис. 4 и 5 как EE. Вся нейтральная шкала,

определяемая как шкала серых от белого до чёрного с одинаковыми кодированными значениями, имеет эти же координаты цветности.

В SMPTE 431-1 [3] координаты цветности белой точки определяются как [0.314 0.351]; на рис. 4 и 5 она обозначена Ref.Proj. Это точка, на которую настроена белая точка проектора. На самом деле, это настройка белой точки комбинации проектора и экрана, поскольку измеряется свет, отражённый от экрана. Ясно, что белая точка для правильно настроенного и калиброванного цифрового проектора не обязана быть такой же, как кодируемая белая точка. Была серьёзная дискуссия, какую кодируемую белую точку выбрать; однако окончательное решение, основанное на том аргументе, что это упростит устройство проектора, состояло в том, чтобы использовать равноэнергетическую точку. Всегда должно быть преобразование из кодированных значений на основе базиса, определяющего аппаратно-независимую систему, в кодированные значения проектора на основе базиса проектора, определяющего аппаратно-зависимую систему. Таким образом, кодируемая белая точка и белая точка проектора – не одно и то же в системе цифрового кинематографа.

Белый, к которому адаптирован зритель, определяется цветовым балансом сцены, устанавливаемым художественными и эстетическими причинами, и не обязан соответствовать ни кодируемой белой точке, ни белой точке проектора. При использовании одной и той же системы кодирования и того же оборудования, фильм может быть тёплым или холодным по цвету, и зритель адаптируется к этому тёплому или холодному изображению. Белые или даже яркие участки не обязаны присутствовать в изображении, чтобы зритель адаптировался к общему балансу изображения – адаптация зрителя, на самом деле, устанавливается по светло-серым деталям изображения.

Суммируя, отметим для памяти три важных пункта, касающихся белого в системе DCDM.

(1) Кодирование белого определяется из кодирующих и декодирующих равенств 1–6. Эти равенства определяют связь между колориметрией и кодируемыми значениями. В системе DCDM значения x_{yU} кодируемого белого равны [0.3333 0.3333 48.00].

(2) Белый проектора определяется правильной настройкой и калибровкой каждого конкретного проектора. Значения x_{yU} эталонного проектора равны [0.314 0.351 48.00].

(3) Адаптационный белый для каждой конкретной сцены определяется создателем изображения и может быть установлен на любые координаты цветности x_{yU} .

Если проектор правильно настроен, и известны базис и белая точка проектора, преобразование между кодированными значениями и внутренними значениями проектора представляет только 3×3 матричный оператор умножения. Процесс вычисления матрицы 3×3 и некоторые особые матрицы 3×3 , представляющие интерес для цифрового кинематографа, будут даны в одной из следующих статей настоящей серии.

Кодирование колориметрии над уровнем чёрного кинозала

В тёмном кинозале часть света отражается на экран и обратно в зал от источников, наличие которых обусловлено инструкциями строительства и безопасности. Кроме того, если на проектор подаются минимальные кодированные значения, разрешённые системой, какой-то свет попадает на экран от проектора, даже если эти кодированные значения определяют отсутствие света. Этот свет – от источников дежурного света и от проектора, когда на него поданы минимальные кодированные значения, разрешённые системой, – отражённый от экрана, будем называть «чёрным кинозала». Это минимальная яркость чёрного, которая может быть измерена на экране в данном кинозале при включённом проекторе. В тёмном кинозале уровень чёрного не меняет измеряемую белую точку, поскольку белый свет проектора много ярче чёрного кинозала.

Отношение яркости белого к яркости чёрного кинозала – это последовательный контраст, который называют иногда просто контрастом. Если бы координаты цветности и яркость чёрного были одинаковы всегда и во всех кинозалах, проблемы бы не было. Однако просмотровые залы имеют обычно меньшую яркость чёрного, чем прокатные кинозалы. Также проекторы со временем совершенствуются, в том числе растёт и контраст. Чем выше контраст при фиксированной белой точке, тем ниже яркость чёрного кинозала.

Если бы кодирование колориметрии DCDM представляло абсолютную колориметрию отражённого от экрана света, тогда кодирование должно было бы представлять свет от проектора плюс уровень чёрного. В абсолютном кодировании колориметрии кодированное значение 0 должно было бы представлять абсолютное отсутствие отражённого от экрана света.

Если кодирование колориметрии в DCDM представляет относительную колориметрию отражённого от экрана света, где относительная колориметрия означает колориметрию света, отражённого от экрана, над чёрным кинозала – тогда кодирование представляет свет, излучаемый проектором при подаче на него кодированных значений, больших, чем минимальные, разрешённые системой кодированные значения, и отражаемый от экрана. Хотя это может звучать как кодирование света, излучаемого проектором, это не так, т.к. участвует также экран – свет измеряется от экрана. Поэтому в относительной колориметрии свет должен измеряться прибором, направленным на экран, а не на проектор. Также минимальные кодированные значения, разрешённые системой, представляют чёрный кинозала, отражённый от экрана, и крайне маловероятно, что найдётся система с нулевой яркостью чёрного.

При подготовке черновых вариантов стандартов SMPTE велась серьёзная дискуссия, должно ли быть кодирование DCDM относительным или абсолютным. В крайнем случае, когда значения XYZ чёрного в кинозале равны

[0 0 0], абсолютная и относительная колориметрии идентичны, и не имеет значения, в каких терминах определена DCDM; однако так никогда не бывает. Также если бы уровень чёрного был одинаков всегда и во всех кинозалах, существовало бы простое преобразование из абсолютной колориметрии в относительную. В общем случае уровень чёрного в одном кинозале (например, в просмотровом) имеет меньшие значения XYZ, чем в другом (например, в прокатном кинотеатре). Тогда спрашивается: «Кодирование какой колориметрии, абсолютной или относительной, даёт лучшее качество, когда один и тот же файл DCDM проецируется в большом количестве различных кинотеатров?» Ответ на этот вопрос определит, какое кодирование использовать в DCDM.

Рассмотрим три кинозала с цифровыми проекторами, калиброванными на яркость белой точки 48 кд/м². Пусть контраст в первом прокатном кинозале составляет 2000:1, т.е. яркость чёрного равна 0.024 кд/м²; второй кинозал – мастеринговый, с контрастом 2000:1; и третий прокатный кинозал имеет контраст 1000:1, т.е. яркость чёрного 0.048 кд/м². Рис. 7 показывает яркость, которая была бы измерена с экрана в случаях кодирования абсолютной и относительной колориметрии, для серии образцов с произвольными номерами 0,1,2,3 и т.д.

На рис. 7 жирная чёрная линия показывает измеренную яркость для первого прокатного кинозала и второго мастерингового кинозала, имеющих контраст 2000:1. Поскольку оба зала имеют одинаковый контраст, не имеет значения, в абсолютной или относительной колориметрии происходит кодирование; результат одинаков в обоих залах.

В данном примере в третьем прокатном кинозале будут отображены различные значения яркости для этих образцов в зависимости от выбора абсолютной или относительной колориметрии для кодирования. Значения яркости образцов при кодировании абсолютной коло-

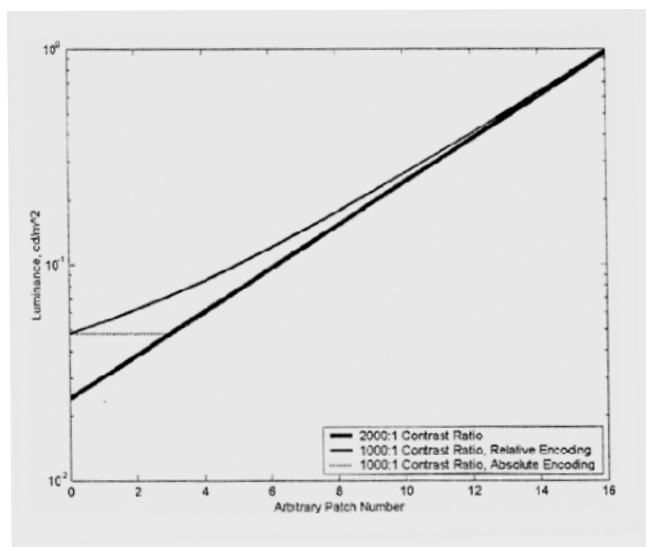


Рис. 7. Влияние контраста кинозала на минимально воспроизводимые яркости

риметрии изображены точечной линией. Для образцов 3–16 точечная линия скрыта жирной чёрной линией; для образцов 1–3 это горизонтальная линия. Кодирование абсолютной колориметрии требует, чтобы система правильно отображала значения яркости, которые она способна отобразить, настолько далеко в область чёрного, насколько возможно (образцы 3–16), и затем все остальные образцы отображаются с яркостью 0.048 кд/м^2 . В результате в кинозале с контрастом 2000:1 образцы 0,1,2 и 3 будут воспроизведены с разной яркостью, но в зале с контрастом 1000:1 при кодировании абсолютной колориметрии эти образцы будут воспроизведены с одинаковой яркостью. Поэтому эти чёрные пропадут в зале с контрастом 1000:1.

Значения яркости образцов при выборе кодирования относительной колориметрии показаны на рис. 7 тонкой линией. Кодирование абсолютной и относительной колориметрии отображает образцы, с номерами 14 и больше, одинаково (или практически одинаково), тогда как образцы 0–13 при кодировании относительной колориметрии имеют большие уровни яркости. Преимущество относительной колориметрии состоит в том, что все эти образцы (0–13) отображаются с разными значениями яркости. Эти образцы будут казаться ярче и менее контрастными при кодировании относительной колориметрии, чем казались бы при кодировании абсолютной колориметрии. Однако при кодировании относительной колориметрии ни один образец не пропадёт. В небольшом эксперименте с цифровым проектором при сравнении одинаковых изображений, демонстрируемых с кодированием абсолютной и относительной колориметрии, все зрители предпочли изображения с кодированием относительной колориметрии.

Кроме рассмотрения изобразительных различий при кодировании относительной и абсолютной колориметрии, существует технологическое различие двух методов кодирования. Используя приведённый выше пример, рассмотрим просмотрный зал с уровнем чёрного 0.024 кд/м^2 и третий прокатный кинозал с уровнем чёрного 0.048 кд/м^2 . Мы рассматривали только значения Y и Y' , но аналогичные расчёты необходимо выполнить и для значений X , Z , X' и Z' . Пусть в «правильном» изображении пиксель должен иметь яркость 0.060 кд/м^2 в просмотрном зале. Поскольку в просмотрном зале уровень чёрного равен 0.024 кд/м^2 , разность между 0.060 и 0.024 равна 0.036 , и значение Y' для 0.036 равно 249, т.е. значение Y' при кодировании относительной колориметрии равно 249. При кодировании абсолютной колориметрии значение Y' соответствует 0.060 кд/м^2 , т.е. равно 303. Хотя есть различие в методах вычисления, неясно, какой из них проще или лучше. На практике закодированные значения изображения будут как-то изменяться цветоустановщиком на основании его представления об экранном изображении, и на стадии кодирования существенной практической разницы не будет. Если принять во внимание процесс демонстрации (декодирования), то разница существенна.

При кодировании относительной колориметрии значение 249 кодирует 0.036 кд/м^2 , и в просмотрном зале результирующая яркость будет равна 0.060 кд/м^2 , как и хотелось. В прокатном кинозале результирующая яркость равна 0.084 кд/м^2 ($0.036 + 0.048 = 0.084$), что выше желаемой яркости, но на том же уровне над чёрным кинозала, что и в просмотрном зале. Во всяком случае, при кодировании относительной колориметрии не потребовалось никаких дополнительных вычислений. При кодировании абсолютной колориметрии в просмотрном зале проектору необходимо задать уровень чёрного 0.024 кд/м^2 и входное закодированное значение 303. Из них проектор должен вычислить, что абсолютная яркость равна 0.060 кд/м^2 . Затем проектор просмотрного зала должен посчитать, что он должен подать на экран дополнительные 0.036 кд/м^2 , и отсюда код 249, кодирующий эту дополнительную яркость. Этот код 249 должен быть подан на исполнительный механизм проектора, чтобы получить правильную яркость на экране. Аналогично, в прокатном кинотеатре такие же вычисления должны быть выполнены внутри проектора. В этом случае проектор должен знать, что чёрный кинозала равен 0.048 кд/м^2 и код 303 кодирует яркость 0.060 кд/м^2 . Затем проектор кинозала должен посчитать, что нужно подать на экран дополнительно 0.012 кд/м^2 , и отсюда код 163, кодирующий эту дополнительную яркость. Этот код 163 должен быть подан на исполнительный механизм проектора, чтобы получить правильную яркость на экране. При кодировании абсолютной колориметрии зритель в просмотрном зале и в прокатном кинотеатре увидит 0.060 кд/м^2 , отражённые от экрана, но потребовались существенные вычисления в проекторе и точное измерение чёрного кинозалов, чтобы эти вычисления были правильными. Вычисления, необходимые при проекции кодов абсолютной колориметрии, могли бы быть проделаны в сервере до подачи изображения на проектор, но это изменяет только место выполнения вычислений, а не отменяет их необходимость. Очевидно, кодирование абсолютной колориметрии налагает существенную нагрузку на систему при проекции.

В результате, с относительной колориметрией файл DCDM, посылаемый в проектор, содержит закодированные значения, определяющие количество света, которое должен послать на экран проектор, и не нужно никакой дополнительной информации или расчётов. С абсолютной колориметрией файл DCDM содержит закодированные значения, определяющие абсолютное количество света, который должен быть отражён от экрана. Таким образом, проектор должен знать чёрный кинозала и рассчитать дополнительное количество света, которое должен подать проектор на экран. Ясно, что кодирование относительной колориметрии определяет более простую в использовании систему.

Сравнение настоящего процесса с проекцией фильмокопии показывает, что результат такой же, как при кодировании относительной колориметрии. Теоретически,

все фильмокопии совершенно одинаковы. Поэтому свет, отражённый от экрана с любой фильмокопией, складывается из чёрного кинозала и света, модулируемого фильмокопией. Если в одном кинозале уровень чёрного выше, тени будут выше, а контраст теней ниже; однако, если два тёмных образца имеют различные оптические плотности, они будут отображены на экране двумя разными яркостями.

Еще одна проблема, которая может существовать в кодировании абсолютной, но не относительной колориметрии, состоит в том, что в кодировании относительной колориметрии закодированные значения представляют уровни света над минимальным светом, отражаемым от экрана в кинозале; поэтому каждое закодированное значение соответствует некоторому уровню света, проецируемого на экран. Нет скрытых или невидимых закодированных значений; однако при кодировании абсолютной колориметрии каждая триада закодированных значений определяет цвет, который, как предполагается, должен быть отображён на экране. Если кодируемый цвет выходит за цветовую гамму, которую способен воспроизвести на экране конкретный проектор – например, цвет темнее чёрного кинозала, тогда цвет будет отображён как чёрный кинозала.

Предположим, изображение готовится системой с некоторым контрастом. При кодировании абсолютной колориметрии некоторые триады закодированных значений будут определять цвета, которые не могут быть в точности отображены, поскольку эти цвета темнее, чем контраст системы. Возможно, некоторые из этих триад попадут в цифровой файл, т.к. при мастеринге они отображались как чёрный кинозала, и это был допустимый цвет для данного элемента изображения. Если в какой-то момент в будущем для демонстрации этого изображения будет использована система с большим контрастом, цвет, определённый этими триадами закодированных значений, будет отображён правильно, а не как чёрный кинозала. Есть большая вероятность, что воспроизведённый цвет отнюдь не является желаемым, т.к. он не был виден при мастеринге. Следовательно, при кодировании абсолютной колориметрии возможны цветовые ошибки, если проектор в кинотеатре имеет больший контраст, чем мастеринговый проектор.

Итак, разница между кодированием абсолютной и относительной колориметрии очевидна при возникновении двух условий: (1) Мастеринг-проектор и кинотеатральный проектор имеют разный контраст и (2) есть контент, который выше чёрного кинозала одного проектора и ниже чёрного кинозала другого проектора. Использование кодирования абсолютной колориметрии означает, что контраст в тенях поддерживается до минимальных яркостей, которые может воспроизвести проектор с меньшим контрастом, а более глубокие тени в файле DCDM воспроизводятся с одинаковой яркостью – поэтому некоторые тени теряются. С другой стороны, при кодировании относительной колориметрии снижается контраст в тенях, хотя поддерживается некоторая дифференциация яркости всех теней файла DCDM – поэтому никакие тени не теряются. Кроме того, в особом случае, когда у мастеринг-проектора контраст меньше, чем у кинотеатрального, существует реальная возможность появления в кинотеатре цветов, которые не были видны при мастеринге. Это может привести к нежелательным цветовым ошибкам в изображении.

Кодирование относительной колориметрии было использовано для файлов DCDM по ряду причин. Кинопленка, являющаяся формой кодирования относительной колориметрии, даёт хорошие изображения в кинотеатрах с различными уровнями чёрного. Кодирование абсолютной колориметрии приведёт к потере теней, а потеря деталей в тенях ухудшает качество изображения. Существует высокая вероятность, что кодирование абсолютной колориметрии внесёт цветовые ошибки в DCDM файл, если файл будет проецироваться системой с большим контрастом, чем при мастеринге. Поэтому закодированные значения DCDM представляют колориметрию над уровнем чёрного кинозала.

Выражение признательности

Данная статья основана на информации Инженерного Справочника SMPTE 432-1, «Обработка цвета для цифрового кинематографа», редактором которого был автор. Автор благодарит всех, внёсших вклад в создание Инженерного Справочника, за полезные и многочисленные предложения, направленные на его улучшение. Автор благодарит также фирму Eastman Kodak за поддержку данной работы. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. SMPTE 432-1. Color Processing for D-Cinema // www.smpte.org.
2. SMPTE 428-1. Digital Cinema Distribution Master (DCDM) — Image Characteristics // www.smpte.org.
3. SMPTE 431-1. D-Cinema Exhibition Screen Luminance Level, Chromaticity and Uniformity // www.smpte.org.
4. SMPTE 431-2. Reference Projector and Environment for Display Of DCDM in Review Rooms and Theaters // www.smpte.org.
5. SMPTE 431-3. Projection Image Measurements // www.smpte.org.
6. *Maier T.* Color Processing for Digital Cinema 1: Background, Encoding and Decoding Equations, Encoding Primaries, and the Exponent (1/2.6), SMPTE Mot. Imag. J., published in this issue.
7. *Barten P. G. J.* Contrast Sensitivity of the Human Eye and Its Effects on Image Quality, SPIE Optical Engineering Press: Bellingham, Washington, 1999.
8. *Cowan M., Kennel G., Maier T. and Walker B.* Contrast Sensitivity Experiment to Determine the Bit Depth for Digital Cinema, SMPTE Mot Imag. J., 113: 281–292, Sept. 2004.