

ISSN: 1991-3400

Мир Кино

ТЕХНИКИ

ЯНВАРЬ-МАРТ | 1(31)-2014 |

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ | ОАО «НИКФИ» | ООО «ИПП «Куна» | Подписной индекс: 81923 в каталоге Роспечати

**КВАНТОВЫЕ
КРИПТОГРАФИЧЕСКИЕ
СИСТЕМЫ**

**АЛГОРИТМЫ
ЦИФРОВОЙ
КОНВЕРГЕНЦИИ
ИЗОБРАЖЕНИЙ
СТЕРЕОПАРЫ**

**ОСОБЕННОСТИ
ЦИФРОВОЙ СЪЁМКИ
И ПРОЕКЦИИ**

**ПОДАВЛЕНИЕ ШУМА
В ЦИФРОВЫХ
ИЗОБРАЖЕНИЯХ
НА ОСНОВЕ
КОНТУРЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ**

**АВТОСТЕРЕОСКОПИЧЕСКИЙ
ДИСПЛЕЙ**

**НА БАЗЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО
ТЕЛЕВИЗОРА**



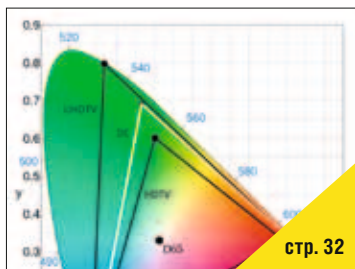
№ 31 СОДЕРЖАНИЕ



стр. 3



стр. 10



стр. 32



стр. 38

Юбилей, знаменательные даты

Юбилей Л.Ф. Артюшина 2

Технологии

В.А. Елхов, Н.В. Кондратьев, Ю.Н. Овечкис, Л.В. Паутова, М.А. Дик
Автостереоскопический дисплей на базе бытового жидкокристаллического телевизора 3

И.В. Газеева, Г.В. Тихомирова, В.Г. Чафонова
Алгоритмы цифровой конвергенции изображений стереопары 10

С.Б. Бирючинский
Квантовые криптографические системы 18

Е. Смирнов, Л.Х. Нурмухамедов
Подавление шума в цифровых изображениях на основе контурлет-преобразования 21

А.С. Подгородняя, С.Б. Одинокоев, Н.М. Вереникина, В.И. Бобринев, А.Ю. Бетин, Е.Ю. Злоказов
Компьютерное моделирование и синтез одномерных микроголограмм Фурье для оптико-голографической памяти 25

Доклады

В.А. Сычёв
Особенности цифровой съёмки и проекции 32

Страницы истории кино

Н.А. Майоров
Самые первые в истории развития мирового кинематографа (продолжение. Начало в МТК № 27, 28, 29) 38

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

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

Электронная версия www.elibrary.ru

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

Руководитель проекта:
Костылев Олег Юрьевич
Главный редактор:
Индлини Юрий Александрович, к.т.н.
Выпускающий редактор:
Захарова Тамара Владимировна
Арт-директор, оформление обложки:
Шишкин Владимир Геннадьевич
Вёрстка и дизайн:
Аверина Наталья Владимировна
Корректор:
Сайкина Наталья Владимировна

Редакционный совет:
Комар В.Г., проф., д.т.н., ОАО «НИКФИ»
Овечкис Ю.Н., д.т.н., ОАО «НИКФИ»
Белоусов А.А., проф., д.т.н., СПбГУКИТ
Тихомирова Г.В., проф., д.т.н., СПбГУКИТ
Сакварелидзе М.А., д.х.н.
Винокур А.И., д.т.н., МГУП им. И. Фёдорова
Гурьев Д.В., к.з.н., ОАО «НИКФИ»
Перегаудов А.Ф., к.т.н., СПбГУКИТ
Блохин А.С., к.т.н., ОАО «НИКФИ»
Барский И.Д., к.т.н., ВГИК
Одинокоев С.Б., д.т.н., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Раев О.Н., к.т.н., МКБК
Волков А.С., к.т.н., Министерство культуры РФ

Отпечатано в ООО «ИПП «КУНА»
Объём 5,5 п.л. Заказ № 127037.
Тираж 600 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 и рецензентов не всегда совпадает с точкой зрения авторов статей.

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



20 марта 2014 года исполняется
90 лет
ЛВУ ФЁДОРОВИЧУ
АРТЮШИНУ,



выдающемуся учёному в области теории
и практики цветовоспроизведения
в репродукционных процессах в кинематографии и полиграфии,
доктору технических наук, профессору, заслуженному деятелю
науки и техники, члену Союза кинематографистов РФ.

■ В кинематографии Лев Фёдорович Артюшин фактически с 1945 года: сразу после войны – поступление на кинооператорский факультет Всесоюзного государственного института кинематографии; 1945–1949 гг. – учёба во ВГИКе, а с 1949 по 2011 год – непрерывная работа в Научно-исследовательском кинофотоинституте. Одновременно с началом работы в НИКФИ Лев Фёдорович поступает на вечернее отделение механико-математического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова.

Первая научная работа – экспериментальное исследование методов цветокоррекции цветных киноплёнок, что было необходимо для создания отечественных маскированных негативных и контратипных киноплёнок.

С 1950 по 1963 год коллектив специалистов под руководством Л. Ф. Артюшина разрабатывает технологию и участвует в создании цветных маскированных негативных и контратипных киноплёнок.

В 1965–1974 гг. – при непосредственном участии Льва Фёдоровича внедряется в промышленность аддитивный способ печати фильмокопий.

В 1964–1975 гг. – Лев Фёдорович разрабатывает и внедряет отечественные телевизионные цветоанализаторы.

В 1988 году – под руководством Льва Фёдоровича разрабатывается и выпускается четырёхслойная плёнка с ахроматическим изображением для телевидения.

В 1974–1993 гг. – коллектив специалистов под руководством Л. Ф. Артюшина создаёт и внедряет систему «Денситометр-ЭВМ», а затем АСУТП печати и химико-фотографической обработки, которая почти 20 лет использовалась на кинокопировальных фабриках и в цехах обработки плёнки ведущих киностудий Советского Союза. В 1978 году система автоматизированного компьютерного контроля фильмовых материалов была удостоена серебряной медали ВДНХ.

В 1990-е годы под руководством Льва Фёдоровича создаётся технология копирования цветных кинофильмов с двух чёрно-белых цветodelённых негативов довоенного времени. Появляется новое направление в кинематографии – «ретро-тиражирование» цветных фильмов.

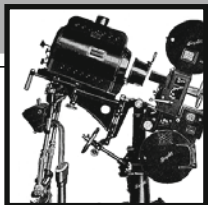
Параллельно с научной работой проходила научно-педагогическая деятельность Льва Фёдоровича – подготовка научных кадров через аспирантуру НИКФИ, научное руководство аспирантами и соискателями, преподавание в Московском полиграфическом институте в течение 20 лет. Им подготовлено более 30 докторов и кандидатов технических наук, которые продолжают успешно работать в разных отраслях науки и техники.

Л. Ф. Артюшин является автором более 20 изобретений, 10 монографий, учебников, учебных пособий и справочников, всего более 200 научных публикаций. Его книги «Основы воспроизведения цвета», «Цветоведение для полиграфистов», «Цветоведение», «Справочник кинооператора» остаются уникальным и наиболее полным источником теоретических и практических знаний в различных областях технического и художественного цветовоспроизведения.

Лев Фёдорович Артюшин – ветеран Великой отечественной войны. Участвовал в прорыве блокады Ленинграда, был участником продолжительных боёв на Курской Дуге в составе Степного фронта. В 1945 году в Восточной Пруссии, Кёнигсберге, был ранен в голову. День Победы встретил в Москве. За боевые заслуги Лев Фёдорович награждён медалями и орденами Красной Звезды и Отечественной Войны I степени, орденом Почёта.

Лев Фёдорович Артюшин – талантливый учёный, обладающий редким даром предвидения, настоящий Учитель, щедро передающий знания ученикам, человек остроумный и жизнерадостный, всегда умеющий создать вокруг себя живую творческую атмосферу. ■

Сотрудники ОАО «НИКФИ» и Редакция журнала «Мир Техники Кино»
поздравляют **Льва Фёдоровича** с юбилеем и желают крепкого здоровья и долгих лет жизни!



АВТОСТЕРЕО- СКОПИЧЕСКИЙ ДИСПЛЕЙ на базе бытового жидкокристаллического телевизора



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

Аннотация

В работе рассматривается возможность реализации автостереоскопического дисплея на базе стандартных жидкокристаллических телевизионных приёмников. Получены аналитические соотношения, связывающие параметры цилиндрических растров и матриц ЖК телевизионных приёмников. Сформулированы рекомендации по изготовлению или подбору доступных линзовых растров для создания автостереоскопических дисплеев на базе бытовых ЖК телевизоров. Предложены и проанализированы варианты реализации таких дисплеев. Создан экспериментальный образец 9-ти ракурсного автостереоскопического дисплея на базе ЖК телевизора Toshiba T39ED33HU.

Ключевые слова: стереоизображение, многоракурсное изображение, безочковый стереопоказ, линзовый растр, телевизор, монитор.

AUTOSTEREOSCOPIC DISPLAY ON THE BASIS OF THE EVERYDAY LCD TV

V. Elkhov, N. Kondratiev, Ju. Ovechkis, L. Pautova, M. Dick

Abstract

The paper considers the possibility of realization of autostereoscopic display on the basis of standard liquid-crystal TV sets. Obtained analytical relations between the parameters of cylindrical raster and matrix of LCD TVs. Recommendations for the production or selection available lens raster to create autostereoscopic displays on the basis of the everyday LCD TVs are formulated. Variants of such displays realization are proposed and analyzed. Experimental sample of 9-view autostereoscopic display on the basis of LCD TV Toshiba T39ED33HU is created.

Keywords: stereo image, multi viewing image, glassesless stereo display, lenticular raster, TVset, display.

■ Современные ЖК телевизоры имеют возможность подключения к компьютеру в качестве монитора, обеспечиваемую наличием в телевизоре HDMI и VGA входов, что успешно реализуется на практике [1]. Преимущества такого применения – относительная

дешевизна бытовых телевизионных приёмников при высоком разрешении Full HD – 1920x1080. В данной работе рассматривается возможность реализации автостереоскопического дисплея на базе стандартных жидкокристаллических телевизионных приёмников.

Пути возможного решения по созданию многоракурсного стереоскопического дисплея на базе панельных жидкокристаллических телевизоров и цилиндрических линзовых растров могут быть основаны на подходе, предложенном исследовательской лабораторией фирмы «Philips» [2–4], сутью которого является применение так называемых наклонных растров. Такие растры позволяют, используя специальную кодировку цветовых составляющих ракурсов стереоскопического изображения, перераспределить падение разрешения, вызванное наличием некоторого числа ракурсов, между горизонтальным и вертикальным направлениями.

Структура пикселей всех ЖК телевизоров аналогична (рис. 1), они имеют форму квадратов размера $b \times b$, состоящих из равных по площади вертикальных прямоугольников основных цветов (RGB). Угол наклона линзового растра выбирается таким образом, чтобы ракурсы в зоне наблюдения формировались группами пикселей из соседних строк и столбцов. Для ЖК телевизоров, это практически однозначно определяет выбор наклона образующей растра к вертикали $\alpha = \arctg(1/3)$. Однако, в отличие от телевизионного стандарта возможности компьютерных входов позволяют независимо и отдельно управлять яркостью цветов каждого пикселя матрицы. Это значительно расширяет возможности адаптации матриц существующих ЖК телевизоров при переходе на субпиксельный уровень кодировки.

Суть метода понятна из рис. 2. Каждый пиксель формируется из разных цветов пикселей, расположенных вдоль образующих линз растра на трёх соседних строках. На рисунке показана схема образования 9-ти ракурсов в зоне наблюдения, на примере одной зоны. Будем называть субпикселями отдельные цветные ячейки пикселей. Первый ракурс образуется субпикселями красного, синего и зелёного цвета, обозначенными цифрой 1, пикселей матрицы, расположенных на трёх смежных строках, второй ракурс включает в себя субпиксели зелёного, красного и синего цвета, обозначенные цифрой 2 и т.д. до 9-го ракурса. Этот процесс периодически повторяется по всем трём смежным строкам.

Следующие три смежные строки так же формируют свои ракурсы, что на рисунке отражено только для одного ракурса, обозначенного цифрой 1*. В нижней части рисунка представлено распределение интенсивностей в зоне наблюдения для каждого ракурса. Видно, что, несмотря на взаимные пересечения, наклонный растр в сочетании с субпиксельной кодировкой обеспечивает хорошую сепарацию ракурсов.

Схема формирования зон видения (вид сверху на плоскость, перпендикулярную экрану и образующим линзового растра) приведена на рис. 2. Каждая последовательная группа из l пикселей, имеющая в направлении, перпендикулярном образующим линзового растра, размер L_n (равный периоду расположения этих групп), формирует на расстоянии Z от растра зоны наблюдения, состоящие из последовательности увеличенных изобра-

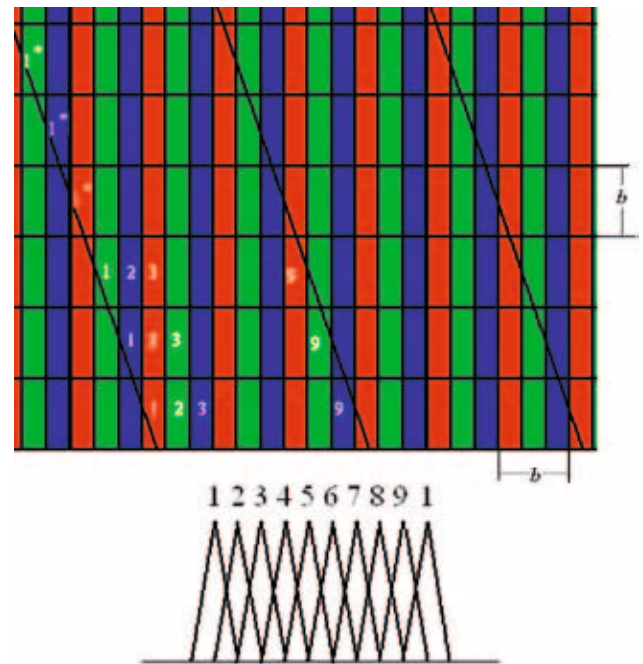


Рис. 1. Схема формирования ракурсов с использованием субпиксельной кодировки, с расположением растра под углом $\arctg(1/3)$

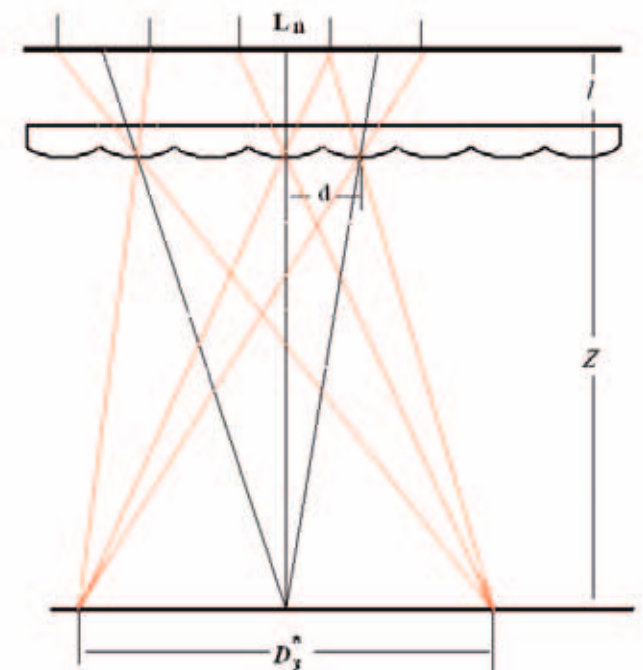


Рис. 2. Схема формирования зон наблюдения в линзорастровой автостереоскопической системе

жений пикселей. Каждый пиксель несёт информацию о цвете и интенсивности соответствующей точки картины определённого ракурса. При идеальной настройке изображения от всех групп пикселей и соответствующих пикселей в группах точно накладываются друг на друга, что позволяет наблюдателю видеть из зоны наблюдения каждым глазом свой ракурс объёмной картины.

Рассмотрим аналитические соотношения, обеспечивающие такую возможность. Очевидно, что фокусное рас-

стояние линз раstra f связано с расстоянием от раstra до экрана l и расстоянием от раstra до мест расположения наблюдателей Z (плоскость зон видения) формулой линзы

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{l} + \frac{1}{Z} \quad (1)$$

Шаг линзового раstra d связан с периодом групп пикселей, формирующих ракурсы L_n , условием попадания тождественных ракурсов в единую область зоны наблюдения. Это приводит к пропорции

$$\frac{d}{Z} = \frac{L_n}{Z+l} \quad (2)$$

Связь между размером зоны наблюдения D_3^* и периодом групп пикселей, формирующих ракурсы L_n , также определяется очевидной пропорцией

$$\frac{L_n}{D_3^*} = \frac{l}{Z} \quad (3)$$

В свою очередь, размер зоны наблюдения D_3 в горизонтальной плоскости рассчитывается по формуле

$$D_3 = \frac{D_3^*}{\cos\left(\arctg\left(\frac{1}{3}\right)\right)} \quad (4)$$

Формулы (1)–(4) полностью определяют необходимые оптико-геометрические параметры растров, позволяющих применить их для построения автостереоскопических систем на базе жидкокристаллических телевизионных приёмников.

Как следует из формулы (3), размер зоны наблюдения

$$D_3^* = \frac{L_n Z}{l} \quad (3a)$$

Из (2) получаем выражение для Z

$$Z = \frac{ld}{L_n - d} \quad (5)$$

и, подставляя в (4), получаем:

$$D_3^* = \frac{L_n d}{L_n - d} \quad (6)$$

Видно, что размер зоны наблюдения полностью определяется только шагом раstra и периодом групп пикселей, формирующих ракурсы. При этом остальные параметры системы (фокусное расстояние линз раstra, расстояние от наблюдателя до экрана и т.д.) не имеют значения. Это важный вывод для понимания того, что неудачный подбор раstra нельзя компенсировать никакими последующими настройками и манипуляциями.

Подстановка в (1) выражения для l из (2)

$$l = \frac{Z(L_n - d)}{d} \quad (7)$$

даёт путём несложных преобразований возможность получить выражение для расстояния от раstra до наблюдателя

$$Z = f \frac{L_n}{L_n - d} \quad (8)$$

Отсюда следует, что соответствующим подбором фокусного расстояния линз раstra можно получить требуемое расстояние от экрана до зон наблюдения.

Изменение фокусного расстояния линз возможно методами, предложенными в наших предыдущих работах [5, 6], например, путём использования иммерсионной жидкости с нужным показателем преломления (раствор глицерина в воде).

Основные параметры ЖК телевизоров, влияющие на оптические и геометрические свойства ЖК матрицы и имеющие значение для данного анализа, связаны с размером диагонали, который, с одной стороны, определяет требуемые размеры и шаг раstra, и, с другой – размер пиксельной ячейки b . В таблице 1 приведены основные геометрические характеристики мониторов ЖК телевизоров, представленных на рынке размеров диагонали экрана (при использовании разрешения Full HD – 1920x1080).

При этом, в зависимости от выбранного числа ракурсов n в зоне наблюдения, период групп пикселей L_n , формирующих ракурсы, рассчитывается по формуле (9), которая легко выводится из схемы, приведённой на рис. 3.

$$L_n = \frac{nb}{3} \times \cos\left(\arctg\frac{1}{3}\right) \quad (9)$$

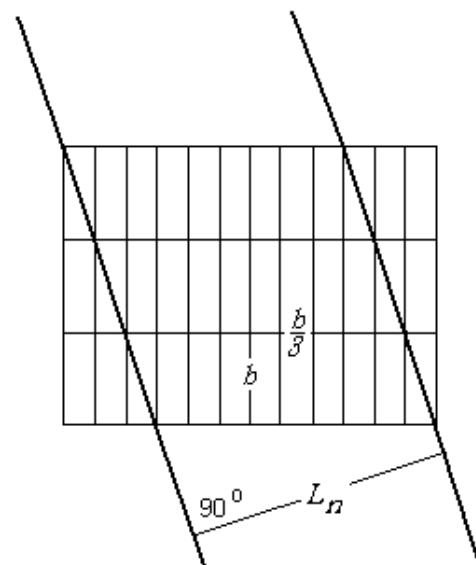


Рис. 3. Взаимное расположение раstra и пиксельной системы ЖК матрицы телевизора

Решение задачи создания автостереоскопического дисплея на базе представленных на рынке ЖК телевизоров возможно двумя путями:

1. Расчёт необходимых параметров цилиндрических растров и последующее их изготовление.

Табл. 1. Основные геометрические параметры ЖК панелей телевизора

Диагональ, дюйм	37	39	40	42	46	47	50
Диагональ, см	93,98	99,06	101,6	106,7	116,8	119,4	127
Ширина, см	81,91	86,34	88,55	92,98	101,8	104	110,7
Высота, см	46,08	48,57	49,81	52,3	57,28	58,26	62,26
Размер пикселя, b , мм	0,427	0,45	0,461	0,484	0,53	0,542	0,577

Табл. 2. Параметры необходимых линзовых растров для ЖК панелей телевизоров

Диагональ, дюйм	37	39	40	42	46	47	50
L_g , мм	1,214	1,28	1,313	1,378	1,509	1,535	1,641
d_g , мм	1,209	1,275	1,307	1,372	1,501	1,527	1,632
f_g , мм	12,14	12,8	13,13	13,78	15,09	15,35	16,41
L_{12} , мм	1,619	1,706	1,75	1,838	2,013	2,048	2,188
d_{12} , мм	1,61	1,696	1,74	1,827	2	2,034	2,172
f_{12} , мм	16,19	17,06	17,5	18,38	20,13	20,48	21,88

2. Подбор близких по параметрам растров из существующих на рынке.

Рассмотрим эти возможности последовательно.

Рекомендуемое расстояние просмотра равно трём диагоналям экрана телевизора, что в рассматриваемом диапазоне телевизионных приёмников даёт среднюю величину $Z = 3000$ мм. Как установлено в наших предыдущих работах [6, 7], достаточный размер зоны наблюдения, обеспечивающий комфортные условия, составляет величину $D_s = 300$ мм, что соответствует на основании выражения (6) $D_s^* = 285$ мм. Такие предположения позволяют нам определить необходимые параметры растров (шаг d и фокусное расстояние f линз) для ЖК панелей телевизоров. Подставляя формулу (1) (при естественном предположении $L \ll Z$) в формулу (3), получаем выражение для определения фокусного расстояния линз раstra

$$f_n \cong \frac{L_n Z}{D_s^*} \quad (10)$$

где n число ракурсов, а требуемый шаг раstra d получается из выражения (2) подстановкой в него l из выражения (3)

$$d_n = \frac{L_n}{1 + \frac{L_n}{D_s^*}} \quad (11)$$

В таблице 2, в качестве примера, приведены результаты расчёта требуемых параметров растров для 6-ти и 9-ти ракурсов, при условии формирования зон наблюдения размером 300 мм на расстоянии 3 м.

Видно, что в рассматриваемом диапазоне диагоналей телевизоров разница периодов растров и групп субпикселей варьируется от 5 до 16 мкм. Выражение (6) позволяет нам оценить требования к точности соблюдения значения периода при изготовлении линзового раstra (поскольку

растр телевизора недоступен для манипуляций и предполагается, что выполнен с необходимой точностью). Положив $L_n \cong d$ и обозначив разницу $\delta d = L_n - d$, получаем

$$D_s^* = \frac{d^2}{\delta d} \quad (12)$$

Оценка влияния изменения δd на размер зоны видения получается дифференцированием

$$\Delta D_s^* = \frac{d^2 \Delta(\delta d)}{(\delta d)^2} \quad (13)$$

или

$$\frac{\Delta D_s^*}{D_s^*} = \frac{\Delta(\delta d)}{\delta d} \quad (14)$$

Таким образом, видно, что определённые относительные изменения в периоде раstra приводят к аналогичным изменениям в размере зоны наблюдения. Иными словами, изменение на 10% шага раstra приведёт к 10%-му изменению размера зоны. Поскольку зона состоит из нескольких ракурсов, то такое изменение приведёт к наложению соседних ракурсов из областей раstra, где такой дефект имеет место.

Максимально допустимой величиной изменения ширины зоны в рассматриваемом диапазоне числа ракурсов может быть принята величина в 5%. Это приводит к требованию аналогичной точности изготовления раstra – для растров рассматриваемого диапазона периодов 1–2 мм, локальные изменения шага раstra не должны превышать 0.05 от разницы этих периодов (5÷16 мкм), т.е. составлять величину, не большую чем 0.25÷3 мкм.

Таким образом, задача изготовления линзовых растров с параметрами, пригодными для применения в автостереоскопической системе на базе ЖК телевизоров,

Табл. 3. Типы растров, представленные на рынке

Тип растра (Lpi)	10	12	15	16	18	20	25	30
Шаг растра (d), мм	2,54	2,117	1,693	1,588	1,411	1,27	1,016	0,847

Табл. 4. Возможные варианты реализации автостереоскопических мониторов на базе ЖК телевизоров и стандартных растров

Диагональ, дюйм	39	39	39	40	40	47	50
Тип растра, Lpi	20	18	15	25	16	15	20
Размер зоны наблюдения, мм	172	192	234	218	162	217	285
Число ракурсов	9	10	12	7	11	10	7

помимо общих технологических трудностей значительно усложняется высокими требованиями, предъявляемыми к точности их изготовления. В связи с этим представляет несомненный интерес альтернативный подход к решению задачи.

Альтернативным изготовлению цилиндрических растров с расчётными параметрами является поиск путей адаптации присутствующих на рынке цилиндрических растров к решению поставленной задачи создания автостереоскопического монитора на базе ЖК телевизоров. Проанализируем возможности подбора растра по близости периодов следования цилиндрических линз периоду пиксельной структуры монитора ЖК телевизора, имея в виду упоминавшуюся выше возможность изменения фокусного расстояния иммерсированием.

На рынке имеются растры с параметрами, которые определяются другими наиболее распространёнными областями применения: формирование стереоскопического и варио-изображений для широкоформатных рекламных щитов, выставочных стендов, рекламы на остановках общественного транспорта и т.д. В интересующем нас диапазоне имеется следующая линейка растров требуемого размера (124x228 см) с числом линз на дюйм (L_n) – 10, 12, 15, 16, 18, 20, 25, с фокусными расстояниями от 1 до 8 мм [8, 9]. В таблице 3 приведены результаты вычисления шага (d) этих растров.

Подбор подходящих растров из числа представленных на рынке легко осуществить на основании сопоставления величин L_n с близкими по значению шагами растров d, что, как показано выше (выражение (6)), определяет размер зоны наблюдения (D_3). Возможные для реализации комбинации приведены в таблице 4.

Полученные данные свидетельствуют о весьма ограниченном круге возможностей подбора из числа стан-

дартных растров. Однако следует отметить, что выбранные пары будут обеспечивать высокое качество стереоскопического изображения в силу выполнения этих условий.

Расширить номенклатуру пригодных по параметрам растров позволяют подходы, рассматриваемые ниже, использование которых позволяет при небольшом ухудшении качества стереоскопического изображения существенно облегчить выбор доступных растров. Рассмотрим вариант взаимного расположения растра и ЖК матрицы телевизора под углом $arctg(1/6)$ [10]. Суть его понятна из рис. 4. Каждый пиксель, как и в рассмотренном выше случае, формируется из разных цветов пикселей, расположенных на трёх соседних строках. На рисунке показана схема образования 9-ти ракурсов в зоне наблюдения, на примере одной зоны. Как и ранее, первый ракурс образуется субпикселями красного, синего и зелёного цвета, обозначенными цифрой 1, пикселей матрицы, расположенных на трёх смежных строках, второй ракурс включает в себя субпиксели зелёного, красного и синего цвета, обозначенные цифрой 2 и т.д. до 9-го ракурса. Этот процесс периодически повторяется по всем трём смежным строкам. Следующие три смежные строки формируют свои ракурсы, со сдвигом на один субпиксель, что на рисунке отражено для ракурсов 1.2...9 (соответствующие им субпиксели имеют индекс *).

В нижней части рисунка представлено распределение интенсивностей в зоне наблюдения для каждого ракурса. Видно, что взаимные пересечения ракурсов при установке решётки под углом $arctg(1/6)$ больше, чем в случае угла $arctg(1/3)$, что должно приводить к некоторому ухудшению восприятия объёма воспроизводимой сцены, однако может обеспечивать достаточно хорошее воспроизведение объёмных изображений при выполнении определённых условий.

Возможные для реализации комбинации автостереоскопических мониторов на базе ЖК телевизоров и

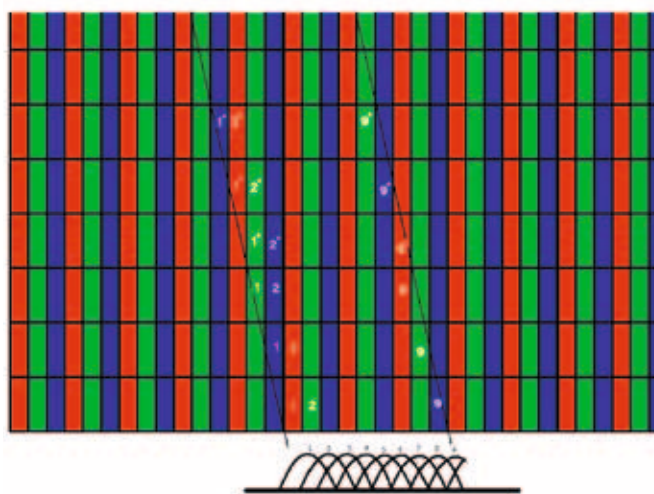


Рис. 4. Схема формирования ракурсов с использованием субпиксельной кодировки, с расположением растра под углом $arctg(1/6)$

Табл. 5. Возможные варианты реализации авто-стереоскопических мониторов на базе ЖК телевизоров и стандартных растров под углом $\arctg(1/6)$

Диагональ, дюйм	42	42	47	47	40	50
Тип растра, Lpi	20	16	16	12	16	15
Размер зоны наблюдения, мм	405	420	144	215	162	222
Число ракурсов	8	10	12	9	12	9

стандартных растров под углом $\arctg(1/6)$ приведены в таблице 5.

В конце раздела рассмотрим случай, когда растр и матрица близки по параметрам, но не удовлетворяют условиям построения изображения с достаточным размером зоны наблюдения. Возможным решением может быть установка растра под углом, немного отличающимся от $\alpha = \arctg(1/3)$, но зато обеспечивающим необходимый период в горизонтальном направлении.

Рассмотрим подробнее этот вариант. На рис. 5 схематически представлены возможные варианты взаимного расположения растра и ЖК панели – установка растра по направлению, совпадающему с углом $\alpha = \arctg(1/3)$ (обозначено чёрными линиями). Довернём растр на угол β такой, что горизонтальная составляющая периода растра совпадёт с целым числом пикселей n . При этом возможны два варианта. При $L < d_n$ поворот будет в левую сторону (красная линия, угол β положительный), $L > d_n$ – поворот в правую сторону (желтая линия, β угол отрицательный). Предположим, что наблюдатель расположен по центру экрана и растр настроен так, что центральная область экрана

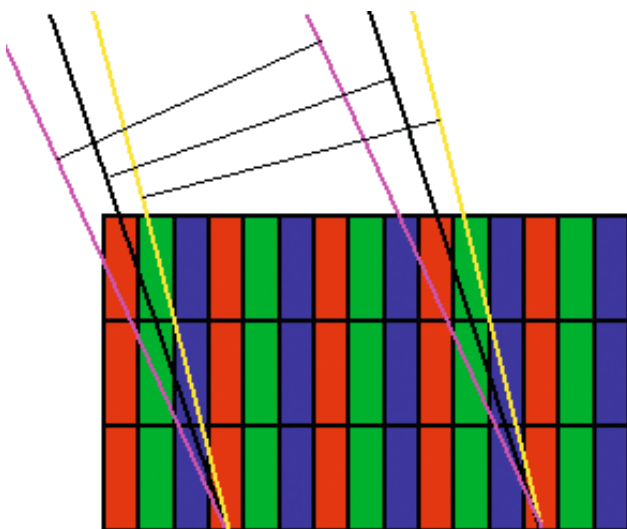


Рис. 5. Альтернативные варианты расположения растра



Рис. 6. Автостереоскопический дисплей на основе телевизора Toshiba T39ED33HU

идеально отъюстирована относительно первого ракурса в зоне наблюдения. Очевидно, что в таком же идеальном положении находятся все субпиксели, расположенные вдоль горизонтальной линии, проходящей через центр экрана. Ясно, что по мере отклонения взгляда вверх или вниз степень рассогласования растра и системы пикселей сначала будет нарастать до максимального значения в половину размера субпикселя и затем постепенно уменьшаться до 0. На той строке, на которой степень рассогласования достигнет значения в целый пиксель, кодировка должна быть сдвинута на один субпиксель.

Этот процесс будет повторяться периодически до края экрана. В областях согласования изображение будет обладать максимально достижимым качеством. Эти области будут чередоваться с областями с ухудшающимся качеством изображения, в которых в глаз попадает смесь соседних ракурсов той или иной пропорции, в зависимости от степени рассогласования. В середине зоны в глаз будут попадать изображения соседних ракурсов равной интенсивности.

Таким образом, в воспринимаемом пространстве будут присутствовать периодически расположенные области, где наблюдается снижение качества стереоскопического изображения. Причём, если в районе этих областей разница между ракурсами будет небольшой (при отсутствии сильных вариаций по глубине), то наблюдатель может их и не заметить. Более детальное описание влияния этого явления и способов его устранения можно будет получить после проведения дополнительных экспериментальных исследований.

Для создания автостереоскопического дисплея с использованием результатов приведённых выше исследований был выбран стандартный линзовый растр 20 Lpi размером 105x60 кв. см. с фокусным расстоянием 3,2 мм, которое путём иммерсирования было увеличено до 12,2 мм. Полученный растр позволил на базе обычного бытового ЖК телевизора Toshiba T39ED33HU



Рис. 7. Ракурс объёмного изображения на экране ЖК монитора

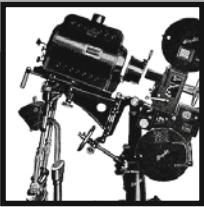
с диагональю 39" и разрешением 1920x1080 создать автостереоскопический дисплей, фотография которого представлена на рис. 6. Для демонстрации на этом дисплее был подготовлен контент, представляющий собой набор из 15 статических объектов и двухминутного фильма, снятого многообъективной камерой [11]. Используя разработанные алгоритмы, были изготовлены 9-ти ракурсные параллакс-панорамограммы с цветовой кодировкой в соответствии с приведёнными выше методами. На экране дисплея можно было наблюдать высококачественное 9-ти ракурсное объёмное изображение указанных объектов и сцен. Индивидуальные зоны наблюдения, поперечный размер которых составил 300 мм, располагаются на расстоянии 3 м от экрана. Фотография одного из ракурсов объёмного изображе-

ния, снятая из зоны видения с экрана дисплея, представлена на рис. 7.

Таким образом, в результате проведённых исследований из условия формирования комфортных для восприятия размеров зон видения стереоизображения получены аналитические соотношения, связывающие параметры цилиндрических растров и матриц ЖК телевизионных приёмников. Это позволило сформулировать рекомендации по изготовлению или подбору доступных линзовых растров для создания автостереоскопических дисплеев на базе бытовых ЖК телевизоров. Предложены и проанализированы варианты реализации таких дисплеев. Создан экспериментальный образец 9-ти ракурсного автостереоскопического дисплея на базе ЖК телевизора Toshiba T39ED33HU. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Телевизор в качестве монитора [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://testlab.by/televizory/39-tv-v-rchestve-monitora>, свободный.
2. *C. van Berkel and J. Clarke*. Characterisation and Optimisation of 3D-LCD Module Design // Proc SPIE. Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems III. – 1997. – Vol. 3012. – P. 179–186.
3. *C. van Berkel, J. Clarke*. Autostereoscopic display apparatus. US Pat. No. 6,064,424, May 2000.
4. *C. van Berkel, D.W. Parker, A.R. Franklin*. Multi-view LCD Display // Proc SPIE. Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems III. – 1996. – Vol. 2653. – P. 32–39.
5. *Elkhov V., Kodratiev N., Ovechkis Yu., Pautova L.* A Modular Projection Autostereoscopic System for Stereo Cinema. "Stereoscopic Displays and Applications XX". 19–21 January 2009, San Jose, California, US, SPIE Vol. 7237, p. 72370D-1–72370D-11.
6. *Елхов В.А., Кондратьев Н.В., Овечкис Ю.Н., Паутова Л.В.* Безочковая система показа объёмных многокурсных киноизображений. // МТК – 2009. – № 11. – С. 2–7.
7. *Елхов В.А., Кондратьев Н.В., Овечкис Ю.Н., Паутова Л.В.* Безочковая система показа объёмных многокурсных изображений. // Запись и воспроизведение объёмных изображений в кинематографе и других областях: Научно-техническая конференция, Москва, 23–24 апреля 2009 г. Материалы и доклады. – М., МКБК, 2009. – 216 с. – С. 27–41.
8. Lenticular sheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.microlens.com/pages/lenticular_sheet.htm, свободный.
9. Lenticular lens sheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lenticular.mobi/10-lpi-PS-lenticular-sheets-117.html>, свободный.
10. *Путилин А.Н., Мухин И.А.* Безочковые устройства воспроизведения объёмного изображения. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ru.okno-tv.ru/biblio/detail.php?ELEMENT_ID=56319&SECTION_ID=56319, свободный.
11. *Елхов В.А., Кондратьев Н.В., Овечкис Ю.Н., Паутова Л.В.* Цифровой синтез многокурсных стереоскопических изображений для безочковой растровой демонстрации. // МТК – 2013. – № 24. – С. 21–25.



АЛГОРИТМЫ ЦИФРОВОЙ КОНВЕРГЕНЦИИ изображений стереопары

И.В. Газеева, к.т.н.,
Г.В. Тихомирова, д.т.н.,
В.Г. Чафонова,
аспирантка, кафедра
киновидеоаппаратуры,
СПбГУКиТ



Аннотация

Изложены разработанные авторами алгоритмы совмещения изображений стереопары с использованием цифровой обработки, реализованные в программной среде Matlab и позволяющие задавать выделенному объекту в изображении нулевой вертикальный параллакс и желаемую величину горизонтального параллакса. Один из алгоритмов основан на создании градиентов изображений и нахождении максимальной корреляции между ними, другой – на использовании детектора точечных особенностей (FAST) для нахождения сопряжённых ключевых точек.

Ключевые слова: алгоритм, стереоизображение, изображения стереопары, вертикальный и горизонтальный параллакс, цифровая обработка изображений, совмещение кадров, цифровая конвергенция, градиент, корреляция.

■ Одним из главных условий комфортного восприятия стереоизображений является выполнение требований к величине параллакса (параллакс – величина взаимного смещения сопряжённых точек в изображениях стереопары). Так, изображения стереопары должны быть выровнены по высоте, т.е. не иметь вертикального параллакса; объекты, воспринимаемые в предэкранном и заэкранном пространствах, должны демонстрироваться с соблюдением предельных величин горизонтальных параллаксов [3, 4]; а объекты на изображении, расположенные в плоскости рамп

ALGORITHMS OF THE DIGITAL STEREOPAIR CONVERGENCE

I. Gazeeva, G. Tikhomirova, V. Chafonova

Abstract

The article is devoted to algorithms of the stereopair assembling generated in the computing environment Matlab, that allow to set zero vertical parallax and any value of horizontal parallaxes. One of algorithms is based on the generation of the gradient of the image and on the finding the location of the highest value in the correlation image. The other algorithm is based on the using of FASTdetector to find matched points in left and right images.

Keywords: algorithm, stereo image, stereopair, vertical and horizontal parallax, digital image processing, pictures assembling, gradient, digital convergence, correlation image.

(или экрана), должны иметь нулевой горизонтальный параллакс [5].

Каким бы способом не осуществлялась стереосъёмка, обязательным этапом формирования стереопары является совмещение отдельно снятых кадров стереопары.

Если при съёмке две камеры расположены параллельно, то всё полученное стереоизображение будет восприниматься в предэкранном пространстве. Изображение, представленное на рис. 1, было образовано простым наложением левого и правого кадров стереопары, вследствие чего все предметы отображаются только перед экраном.

Для того, чтобы часть объектов изображалась за экраном, применяют стереосъёмку на конвергированных оптических осях. В отличие от съёмки на параллельных осях, съёмка на конвергированных осях позволяет выставить в пространственной композиции плоскость нулевых параллаксов. Однако в этом случае возникают проективные искажения (рис. 2), выражающиеся в разномасштабности идентичных участков изображений для левого и правого глаза. При этом в стереопаре появляются вертикальные параллаксы, увеличивающиеся к краям изображения, что отрицательно влияет на комфортность наблюдения стереоизображения [6]. Если снять таким образом прямоугольник, он получится на обоих кадрах в виде трапеций.

Выставить в пространственной композиции плоскость нулевых параллаксов (т.е. получить некий эффект съёмки на конвергированных осях) без возникновения проективных искажений возможно и при стереосъёмке на параллельных осях, но либо путём децентрирования стереооптики съёмочных камер (мнимая конвергенция), либо на этапе последующей обработки изображений стереопары путём их цифровой конвергенции.

Под «цифровой конвергенцией» будем иметь в виду цифровую обработку левого и правого изображений стереопары, которая позволяет совместить изображения



Рис. 1. Анаглифное изображение, образованное наложением левого и правого кадров стереопары, снятых камерами на параллельных оптических осях

стереопары таким образом, чтобы обеспечить нулевые горизонтальный и вертикальный параллаксы объекту, который по замыслу должен располагаться в плоскости рамп (или экрана).

Тестирование возможностей применения существующих программ для осуществления цифровой конвергенции изображений стереопары

В настоящее время существуют различные программы по совмещению и обработке изображений стереопары, однако выставление величины параллаксов в данных программах осуществляется чаще всего или субъективно («на глаз»), или же автоматически. При этом довольно редко удаётся достичь желаемого результата.

Неточность при совмещении левого и правого кадров может привести к наличию нежелательных параллаксов, величина которых будет увеличиваться с размером печатной фотографии или размером экрана, на который будет проецироваться полученное изображение.

Для проверки точности совмещения изображений нами были обработаны одни и те же кадры стереопары разрешением 2828x1850 пикселей несколькими программными продуктами: AnaglyphMaker, Roxio Central (3DPhotoCreator) и StereoPhotoMaker. Параметры компьютера, который использовался при этом, следующие:

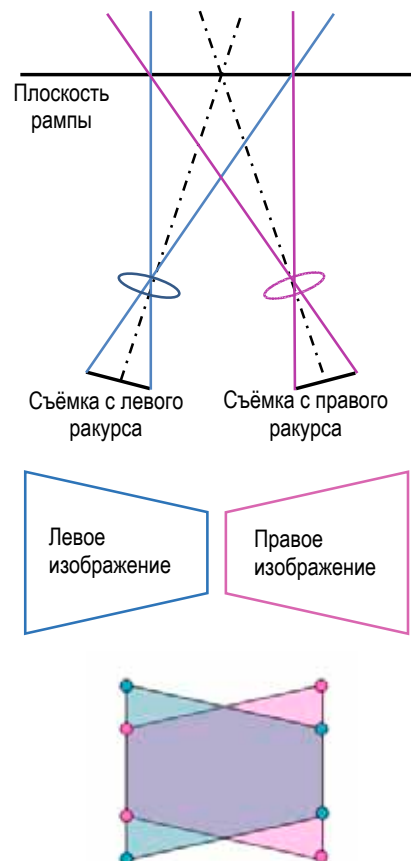


Рис. 2. Схема, поясняющая возникновение проективных искажений в изображениях стереопары, снятых камерами на конвергированных оптических осях

щие: операционная система – Windows 7, Корпорация Майкрософт (Microsoft Corp.), 2009. Процессор Intel(R) Core™ i3-2330M CPU @2.20 GHz 2.20GHz, установленная память (ОЗУ) 3,00 Гб. Тип системы: 64-разрядная операционная система.

На рис. 3 показаны исходные левый и правый кадры стереопары. Совместим данные изображения, конвергировав их методами цифровой обработки на некотором объекте, например, на вазе, т.е. зададим данному объекту нулевые горизонтальный и вертикальный параллаксы.

Программа AnaglyphMaker (разработчик Takashi Sekitani) позволяет совмещать кадры стереопары в ручном режиме. Для того, чтобы конвергировать изображе-



а



б

Рис. 3. Исходные кадры: а) левый, б) правый



Рис. 4. Стереопара, сформированная в автоматическом режиме программы StereoPhotoMaker

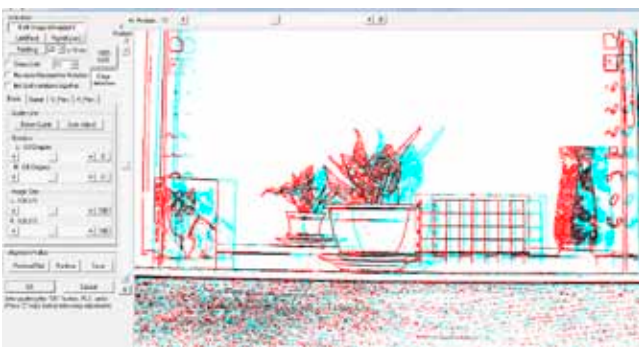


Рис. 5. Совмещение кадров по их контурным изображениям в программе StereoPhotoMaker

ния стереопары на объекте, необходимо, сдвигая левый кадр относительно правого, достичь максимальной резкости этого объекта в анаглифном изображении. Однако, точность совмещения изображений в данном случае невелика, поскольку во многом зависит от субъективного восприятия человека, формирующего стереопару.

Программа Roxio Central (разработчик Rovi Corporation) позволяет совмещать кадры стереопары тем же способом, что и в описанной выше программе. Точность совмещения изображений в данном случае также определяют субъективные факторы. Кроме того, недостатком

программы является невозможность отдельного сохранения левого и правого изображения совмещённой стереопары.

Программа StereoPhotoMaker (разработчики Masuji Suto, David Sykes) позволяет совмещать кадры стереопары двумя способами.

Первый способ – совмещение изображений в автоматическом режиме. В данном случае, изображения оказались конвергированы не по желаемому объекту (вазе), а по объекту, расположенному на переднем плане снимаемой сцены, – цветочному горшку (рис. 4). В данном случае все объекты изображаются только в заэкранном пространстве, что ухудшает зрелищность рассматриваемого стереоизображения. Время, затраченное на выполнение данной операции, составило 4,5 секунды.

Второй способ – совмещение изображений в ручном режиме. Хотя в данной программе существует возможность совмещения кадров и по их контурным изображениям (рис. 5), что является её преимуществом, точность совмещения стереопары так же, как и в других программах, во многом зависит от зрения человека, формирующего стереопару.

Таким образом, существующие программные продукты не дают возможность в автоматическом режиме и с высокой точностью выполнить цифровую конвергенцию изображений стереопары на желаемом объекте.

Разработка алгоритмов цифровой конвергенции изображений стереопары в среде Matlab

Предлагаемые в работе алгоритмы цифровой конвергенции изображений стереопары позволяют выделить желаемый объект и с высокой точностью выставить для него нулевые вертикальный и горизонтальный параллаксы, или же задать объекту положительный (или отрицательный) горизонтальный параллакс, и таким образом получить различное его пространственное расположение в стереоизображении в предэкранном или заэкранном пространстве.

Первый алгоритм основан на выделении объекта в изображении, создании градиентов изображений, а так-

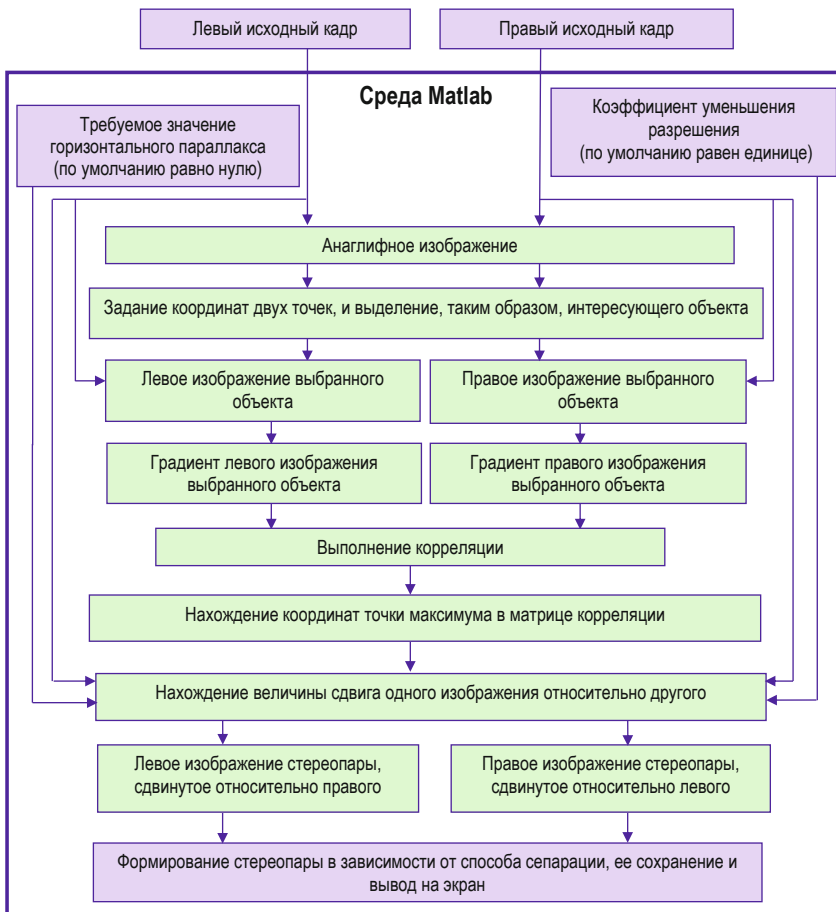


Рис. 8. Изображения выделенного объекта: а) левое, б) правое

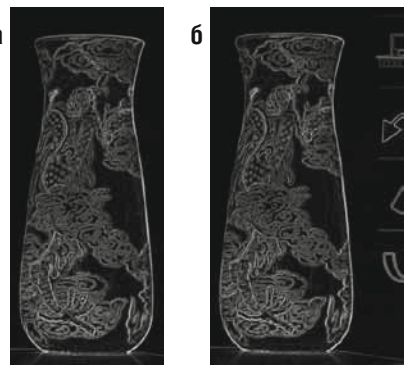


Рис. 9. Градиенты изображений выделенного объекта: а) левого изображения, б) правого изображения

Рис. 6. Схема алгоритма цифровой конвергенции стереопары, основанного на корреляции изображений



Рис. 7. Выделение объекта, для которого в дальнейшем будет выставлено заданное значение горизонтального параллакса

же нахождения максимальной корреляции между ними. Схема данного алгоритма представлена на рис. 6. Рассмотрим данный алгоритм подробнее.

Шаг 1. Прежде всего, левый (рис. 3а) и правый (рис. 3б) кадры стереопары, снятые с двух разных ракурсов, загружаются в программную среду Matlab.

Шаг 2. Задаём требуемую величину горизонтального параллакса для нужного нам объекта (например, ваза), а также, если необходимо, коэффициент уменьшения раз-

решения. В данном примере зададим параллакс, равный нулю.

Шаг 3. Объединив красную составляющую левого кадра стереопары, а также зелёную и синюю составляющие правого кадра стереопары, выводим анаглифное изображение на экран.

Шаг 4. При помощи курсора (или вводя значения), задаём координаты двух точек (рис. 7), выделяя таким образом объект, для которого в дальнейшем мы выставим заданное ранее значение горизонтального параллакса.

Шаг 5. С помощью заданных координат двух точек образуются левое и правое изображения выбранного объекта (рис. 8).

Шаг 6. Получаем градиенты левого и правого изображений выделенного объекта (рис. 9).

Градиентом двумерной функции $f(x, y)$, где x, y – пространственные координаты, а амплитуда f – уровень яркости изображения в этой точке, называется вектор, модуль (длина) которого равен:

$$|\nabla f| = \text{mag}(\nabla f) = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} = \left[(\partial f / \partial x)^2 + (\partial f / \partial y)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

Данную величину аппроксимируют с помощью суммы абсолютных величин:

$$|\nabla f| \approx |G_x| + |G_y| \quad (2)$$

Такое приближение равно нулю на областях с постоянной яркостью (цветом) пикселей, и его величина пропорциональна степени изменения яркости на неоднородных областях [2].

Шаг 7. Решаем корреляционную задачу, заключающуюся в нахождении позиции на градиенте левого изображения выделенного объекта (рис. 9а), которая лучше всего соответствует градиенту правого изображения выделенного объекта (рис. 9б).

Корреляция (корреляционная функция) определяется следующим выражением:

$$f(x, y) \circ h(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m, n)h(x+m, y+n) \quad (3)$$

где $f(x, y)$, $h(x, y)$ – изображения размером $M \times N$, для которых вычисляется корреляция [1]. В нашем случае $f(x, y)$ и $h(x, y)$ – градиент левого и правого изображений выделенного объекта, соответственно.

Корреляция состоит в прохождении одного изображения по другому изображению. Одно из изображений перемещается от пиксела к пикселу по другому, накрывая различные окрестности. Применяемое при этом преобразование состоит из умножения каждого пиксела окрестности, которая накрывается изображением на соответствующий пиксел данного изображения и суммирования этих произведений для получения результирующего отклика процесса в каждой точке изображения. Результирующее значение приобретает пиксел, расположенный в этот момент под центром перемещаемого изображения.

Наилучшее совпадение двух изображений считается там, где обнаруживается точка максимума результирующей матрицы корреляции (рис. 10).

Шаг 8. Определяем координаты точки наилучшего совпадения одного изображения с другим, т.е. координаты точки максимума результирующего изображения корреляции.

Шаг 9. На основании координат точки максимума в матрице корреляции определяем в пикселах величину сдвига одного изображения относительно другого, увеличиваем полученную величину сдвига на заданный ранее коэффициент уменьшения разрешения, и таким образом определяем конечный размер кадров стереопары и будущего стереоизображения с учётом нулевого вертикального параллакса и требуемой величины горизонтального параллакса.

Шаг 10. Объединив красную составляющую левого кадра стереопары, а также зелёную и синюю составляющие правого кадра стереопары, получим изображение, предназначенное для просмотра в анаглифных красно-голубых очках (рис. 11). Можно заметить, насколько точно выполнена цифровая конвергенция левого и правого

кадров стереопары. Выбранный объект (ваза) имеет нулевой вертикальный и заданный нулевой горизонтальный параллакс.

Все операции предложенного алгоритма, за исключением первых шагов, выполняются полностью автоматически. Таким образом, оператору, который совмещает изображения, достаточно только задать координаты двух точек, выделяя объект, для которого требуется выставить определённое значение горизонтального параллакса и, если необходимо, ввести коэффициент уменьшения разрешения изображений для ускорения выполнения всего алгоритма.

Время выполнения данного алгоритма для цифровой конвергенции исходных кадров размером 2828×1850 пикселей, без уменьшения разрешения и без учёта времени, затраченного на задание координат двух точек для выделения нужного объекта, составило 8,5 секунд. Из них большая часть – 7,82 секунды (92%) была затрачена на выполнение корреляции, остальные операции длились менее 0,2 секунды (измерения времени выполнения алгоритма проводились автоматически в программной среде Matlab).

При уменьшении разрешения изображений в три раза, и также без учёта времени, затраченного на задание координат двух точек для выделения нужного объекта, время выполнения данного алгоритма составило 0,5 секунды, что на 93,75% быстрее. Каждая из операций алгоритма длилась не более 0,19 секунды. Таким образом, цифровая конвергенция кадров стереопары происходит в считанные доли секунды, и при этом точность совмещения уменьшается незначительно. Например, для изображений с разрешением 2828×1850 пикселей, при уменьшении разрешения в три раза, точность совмещения кадров может уменьшиться только на 1 пиксел.

Предложенный алгоритм цифровой конвергенции изображений стереопары может быть реализован в любой версии программной среды Matlab, включающей набор команд Image Processing Toolbox.

Другой предлагаемый алгоритм основан на выделении объекта в изображении, для которого мы хотим задать определённый параллакс, обнаружении ключевых точек на выделенном изображении объекта при помощи алгоритма



Рис. 10. Изображение матрицы, полученной в результате корреляции



Рис. 11. Анаглифное изображение, автоматически сформированное цифровой конвергенцией по выбранному объекту (вазе) при помощи разработанного алгоритма

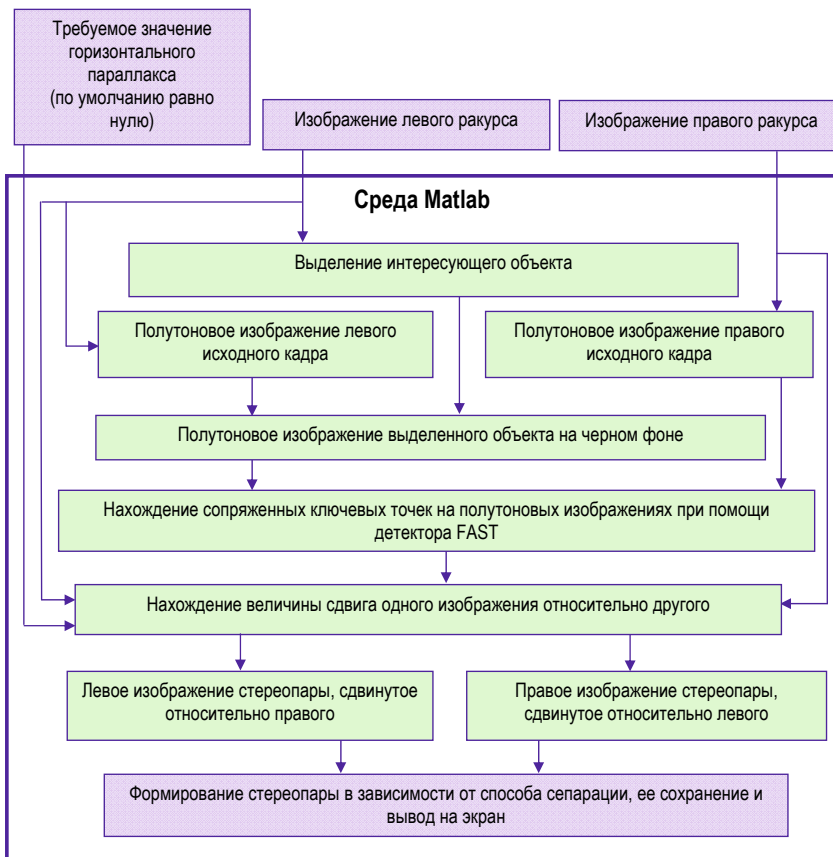


Рис. 12. Схема алгоритма цифровой конвергенции изображений стереопары с использованием детектора FAST

FAST и нахождении соответствующих точек на другом кадре стереопары. Схема данного алгоритма представлена на рис. 12. Рассмотрим подробнее этот алгоритм.

Шаг 1. Прежде всего, как и в предыдущем алгоритме, левый (рис. 3, а) и правый (рис. 3, б) кадры стереопары загружаются в программную среду Matlab.



Рис. 13. Выделение объекта, для которого ранее задали требуемую величину горизонтального параллакса

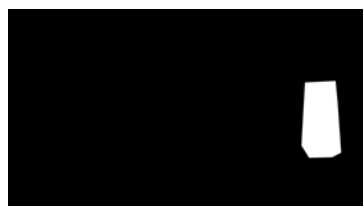


Рис. 14. Бинарная маска выделенного объекта



Рис. 15. Полутоновые изображения исходных кадров: а) левое, б) правое

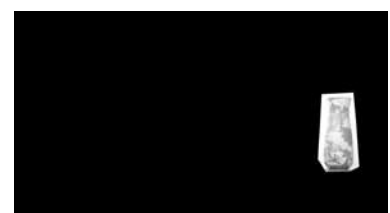


Рис. 16. Полутоновое изображение объекта, выделенного ранее на левом кадре

Шаг 2. Задаём требуемую величину горизонтального (положительный, отрицательный или нулевой) параллакса для нужного нам объекта (например, ваза).

Шаг 3. Одно из изображений, например, левое, выводится на экран, и мы при помощи курсора выделяем объект, для которого в дальнейшем выставим заданное значение параллакса (рис. 13). При этом образуется т.н. бинарная маска того же размера, что и исходное изображение, но с единицами внутри интересующей нас области и с нулями вне её (рис. 14).

Шаг 4. Преобразуем левый и правый исходные кадры в полутоновые изображения (рис. 15).

Шаг 5. Перемножая поэлементно матрицу левого полутонового изображения и бинарную маску объекта, выделенного ранее на левом исходном кадре, получаем матрицу полутонового изображения интересующего нас объекта (рис. 16).

Шаг 6. Пользуясь детектором точечных особенностей FASTdetector (Features from Accelerated Segment Test [10]), определяем на полутоновом изображении выделенного объекта и на правом полутоновом изображении соответствующие друг другу ключевые точки (рис. 17).

Детектор точечных особенностей FAST (рис. 18) заключается в том, что яркость пикселей, лежащих на окружности, сравнивается с яркостью центральной точки и на основании ряда проверок принимается решение, является ли центральная точка ключевой (особой) [10].

Применять другие детекторы для обнаружения сопряжённых ключевых точек с целью цифровой конвергенции кадров стереопары в нашем случае не так удобно. Например, алгоритмы SURF [7] или MSER образуют нежелательные посторонние точки, а при ис-

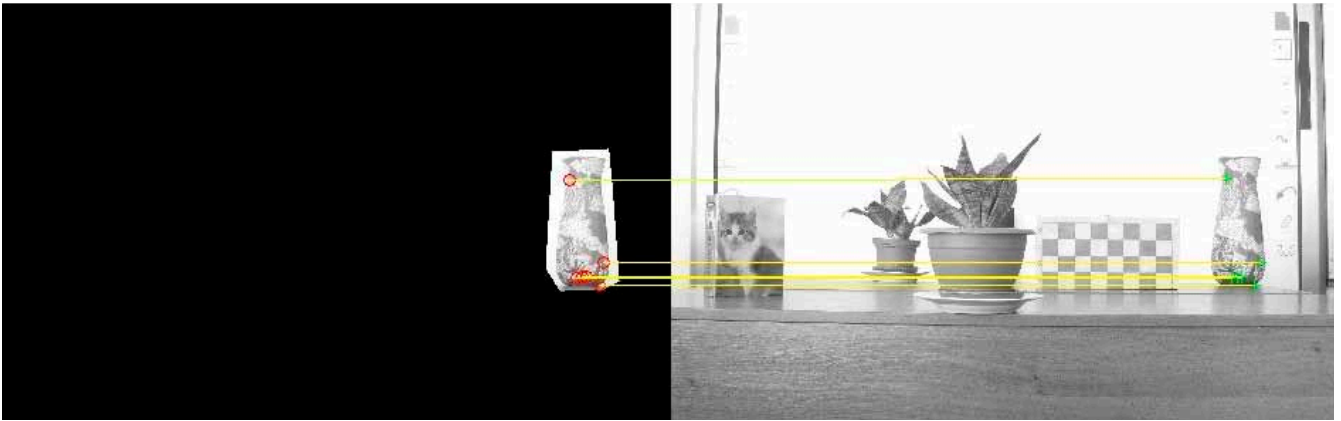


Рис. 17. Ключевые точки полутонового изображения выделенного объекта, сопряжённые с ключевыми точками полутонового правого изображения стереопары

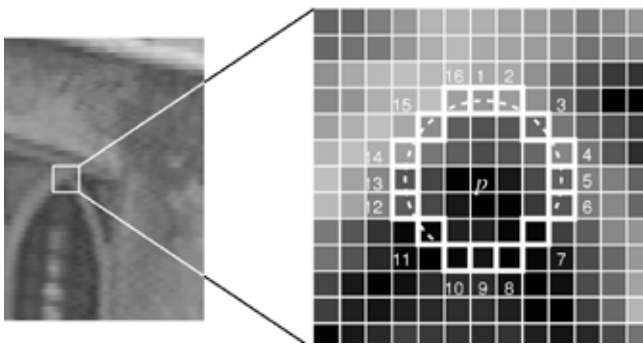


Рис. 18. Анализируемая точка и окружающие её пиксели, используемые в алгоритме FASTdetector



Рис. 19. Анаглифное изображение, автоматически сформированное цифровой конвергенцией по выбранному объекту (вазе) при помощи разработанного алгоритма

пользовании Harrisdetector сопряжённые точки зачастую вовсе не отображаются.

Шаг 7. На основании координат сопряжённых точек, нулевого вертикального параллакса и заданной вначале величины горизонтального параллакса определяем в пикселах величину сдвига одного изображения относительно другого, а затем и конечный размер кадров стереопары и будущего стереоизображения.

Шаг 8. Так же, как и в предыдущем алгоритме, объединив красную составляющую левого кадра стереопары, а также зелёную и синюю составляющие правого кадра стереопары, получим изображение, предназначенное для просмотра в анаглифных красно-голубых очках (рис. 19). На представленном рисунке можно заметить, насколько точно совмещены левый и правый кадры стереопары. Изображения стереопары конвергированы по желаемому объекту (ваза), размеры параллаксов соответствуют требуемым величинам и равны нулю.

Все операции предложенного алгоритма, так же, как и предыдущего, выполняются полностью автоматически, за исключением первых шагов. Оператору достаточно только выделить объект, для которого необходимо задать значение горизонтального параллакса.

Время выполнения данного алгоритма значительно меньше, чем предыдущего. Так, для изображений с разрешением 2828x1850 пикселей оно составило 0,776 секунды, без учёта времени, затраченного на выделение объекта. Каждая из операций алгоритма длилась не более 0,18 секунды. Для цифровой конвергенции кадров, снятых с достаточно высоким разрешением, данный алгоритм является более предпочтительным, поскольку для его выполнения не требуется уменьшение разрешения, а значит, совмещение изображений будет выполнено с более высокой точностью.

Однако, для реализации данного алгоритма в программной среде Matlab требуется наличие не только набора команд Image Processing Toolbox, но и алгоритма FASTdetector.

Таким образом, предложенные в работе алгоритмы позволяют выполнить в автоматическом режиме цифровую конвергенцию изображений стереопары по выбранному объекту, и тем самым, выставить в пространственной композиции плоскость нулевых параллаксов.

В качестве примера на рис. 20 и 21 показаны изображения, сформированные цифровой конвергенцией по другим объектам (по цветочному горшку, шахматной доске) с нулевым горизонтальным параллаксом. Объект,



Рис. 20. Анаглифное изображение, автоматически сформированное цифровой конвергенцией по выбранному объекту (цветочному горшку)

по которому выполнена конвергенция, воспринимается зрителем в плоскости экрана. Предметы, находящиеся ближе, чем этот объект, воспринимаются как находящиеся в предэкранном пространстве, а те, которые дальше его – в заэкранном пространстве.

При помощи разработанных алгоритмов можно также измерить горизонтальный и вертикальный параллаксы у объектов на готовой стереопаре в пикселах и/или процентах от общего размера изображения, а также узнать, не будут ли они превышать допустимые пределы при печати или проекции. И если необходимо, то значение параллакса объекта, например, переднего (заднего) плана можно подкорректировать, сдвинув плоскость нулевых параллаксов.

Алгоритм, основанный на корреляции двух градиентных изображений, позволяет также измерить горизонтальный и вертикальный параллаксы у объектов на любом неразделённом анаглифном изображении. Для этого необходимо выделить отдельно красную, а также зелёную и синюю составляющие, разделив изображение таким образом на левое и правое изображения стереопары, а затем применить описанный в работе алгоритм. Автоматически измерить параллаксы вторым предложенным алгоритмом в данном случае не удастся, так как сопряжённые точки двух изображений не будут обнаружены, вследствие достаточно разных яркостей левого и правого кадра.

Заключение

Предложенные алгоритмы совмещения кадров стереопары позволяют автоматически выполнить цифровую конвергенцию изображений стереопары по выделенному объекту или задать для него желаемую величину горизонтального параллакса, обеспечить нулевой вертикальный параллакс, а также определить, не превышают ли допустимый предел отрицательные и положительные параллаксы в полученной стереопаре. Для автоматического совмещения левого и правого кадров по данным алгоритмам достаточно только выделить требуемую об-



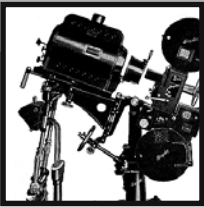
Рис. 21. Анаглифное изображение, автоматически сформированное цифровой конвергенцией по выбранному объекту (шахматной доске)

ласть изображения и задать необходимую величину горизонтального параллакса.

Применение данных алгоритмов при совмещении изображений стереопары позволит облегчить и ускорить работу по созданию стереоизображения, комфортного для восприятия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005.
2. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. М.: Техносфера, 2006.
3. Елхов В.А., Кондратьев Н.В., Овечкис Ю.Н., Паутова Л.В. Анализ параметров многообъективной съёмки в системе безочкового кинопоказа многокурсовых стереоизображений // МТК № 16, 2010.
4. Комар В.Г., Рожков С.Н., Чекалин Д.А. Необходимость нормирования параметров стереопары и стереопроекции с целью снижения зрительного дискомфорта в условиях кинозала // МТК № 24, 2012.
5. Мелкумов А.С. Основы стереографии // МТК № 18, 2010.
6. Рожков С.Н., Овсянникова Н.А. Стереоскопия в кино-, фото-, видеотехнике. Терминологический словарь. М.: Парадиз, 2003.
7. Чертихин А.А., Винокур А.И. Использование алгоритма поиска ключевых точек в информационной системе, обеспечивающей стабильность кадра при оцифровке архивных киноматериалов // МТК № 26, 2012.
8. Яне Б. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2007.
9. Rosten E., Drummond T. Fusing Points and Lines for High Performance Tracking // IEEE International Conference on Computer Vision 2, 2005.
10. Rosten E., Porter R., Drummond T. Faster and better: a machine learning approach to corner detection // DRAFT, 2011.
11. Rosten E., Drummond T. Machine learning for high-speed corner detection // Proc. European Conference on Computer Vision, V. 1, 2006.



КВАНТОВЫЕ КРИПТОГРАФИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ



С.Б. Бирючинский,
к.ф.-м.н., СПбГУКиТ

Аннотация

Рассмотрены некоторые способы реализации многоканальности в квантово-криптографических системах. Предложена методика построения псевдо-квантово-криптографических систем и метода взлома некоторых видов квантовых каналов передачи данных.

Ключевые слова: квант, фотон, криптография, оптическая система, линия связи.

Квантовая криптография – это система защиты (шифрования) информации, базирующаяся на принципах квантовой механики [1]:

- невозможность различия двух неортогональных квантовых состояний с абсолютной надёжностью;
- запрет на клонирование;
- наличие перепутанных/запутанных квантовых состояний;
- причинность и суперпозиция.

Передача информации с использованием квантовых свойств частиц рассматривается как часть симметричной криптографической системы, используемая для распределения ключей (как долговременных, так и кратковременных) между пользователями. Существуют два основных типа систем квантовой передачи ключа: системы с поляризационным и с фазовым кодированием.

В первом случае кодирование осуществляется состоянием поляризации. Во втором – благодаря корпускулярно-волновому дуализму понятие фазы излучения справедливо и для отдельных фотонов. В простейшем случае для детектирования изменения фазы применяется интерферометр Маха-Цендера с однофотонными источниками и приёмниками излучения [2, 9].

На принципе передачи информации посредством кодирования в состояниях единичных фотонов основаны различные протоколы квантовой криптографии: BB84,

QUANTUM CRYPTOGRAPHIC SYSTEMS

S. Biryuchinskiy

Abstract

Some methods of implementation multichannel in quantum-cryptographic systems are considered. The technique of creation of pseudo-quantum-cryptographic systems and a hacking method of some types of quantum data channels is offered.

Keywords: quantum, photon, cryptography, optical system, communication line.

B92, BB84(4+2), с шестью состояниями, Гольденберга-Вайдмана, Коаши-Имото и др. [2, 10].

Одним из основных недостатков современных систем квантовой криптографии является низкая скорость передачи данных, что обусловлено как техническими ограничениями для существующих систем, так и ограничениями, вызванными применяемыми алгоритмами. Использование систем с малой скоростью передачи данных не позволяет полностью реализовать все возможные методы криптографической защиты.

Для обеспечения наивысшего уровня секретности в симметричных криптосистемах необходимо формировать последовательность криптографического ключа с длиной, равной длине передаваемого сообщения.

Поскольку скорость передачи данных в существующих системах квантовой криптографии низка, устойчивость систем к шумовым воздействиям является слабой. Причём факторы, ограничивающие скорость передачи данных в каналах связи (несовершенство оптических волокон, турбуленция и т.д.), влияют на квантовый канал в большей степени (степень влияния зависит также от типа системы передачи ключа).

Одним из способов повышения скорости передачи информации является переход к многоканальным системам. Ниже предложены варианты архитектуры различных многоканальных систем связи, использующих методы кванто-

вой криптографии, позволяющие многократно увеличить пропускную возможность кодированного канала передачи данных и улучшить его устойчивость к шумам.

Одним из методов перехода к многоканальности в квантовых криптографических системах является одновременное использование на передающей стороне нескольких источников фотонов с различными длинами волн, передаваемых по одному и тому же каналу связи. Разделение фотонов по частоте в этом случае осуществляется классическими методами спектральной селекции. Главными преимуществами использования спектральной селекции каналов являются невысокая сложность системы и простота её реализации. Существенным недостатком в данном случае является пропорциональное уменьшению надёжности работы линии связи. Мультиволновому каналу связи с дискретным набором частот также присущи все недостатки монохроматического канала. Степень защиты может быть увеличена как посредством добавления резервных каналов, так и применением численных методов кодирования сигнала, повышающих его стойкость к шумам. В этом случае для контроля качества канала связи в реальном времени и предотвращения попыток взлома могут быть использованы дисперсионные характеристики волоконно-оптических линий связи [6].

Наилучшие результаты демонстрирует квантовая широкополосная передача информации, позволяющая радикально улучшить пропускную ёмкость линии связи. Представленный метод позволяет передавать сразу несколько бит информации за время генерации единичного фотона.

На рис. 1 представлена многоканальная оптическая система передачи информации, использующая технологию квантовой криптографии с частично взаимной передачей между каналами.

Основной лазерный излучатель имеет канал обратной связи. Сигнал обратной связи генерируется анализатором 4. В зависимости от пришедшей по цепи обратной связи информации, выполняется управление вспомогательным лазерным излучателем 2. Так как в данном случае используется эффект зависимости угла поворота плоскости поляризации от длины волны излучения, система является многоканальной. Наличие дифракционной решётки после волоконно-оптической линии передачи не всегда является обязательным, поскольку фотодетекторы узла 5 могут работать на простых принципах (т.к. фотоны с различной длиной волны обладают различной поляризацией).

В данном методе квантовое кодирование реализуется посредством как поляризационных различий, так и фазовых параметров волны. Разделение каналов по длине волны также является возможным. Методика разделения каналов может быть различна во времени, таким образом позволяя улучшить устойчивость системы к шумам и защищённость её от взлома. Количество независимых каналов может составлять от десятков для простых схем до сотен тысяч в сложных структурах. Практически оно ограничено как качеством изготовления комплек-

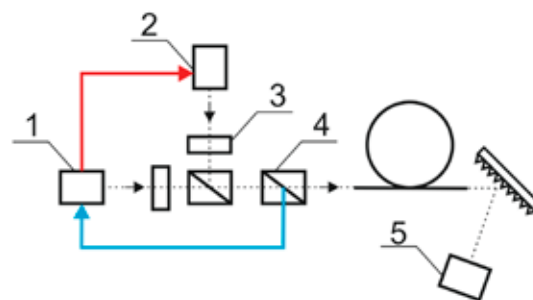


Рис. 1. Многоканальная оптическая система передачи информации, использующая технологию квантовой криптографии с частично взаимной передачей между каналами: 1 - основной лазерный излучатель, 2 - вспомогательный лазерный излучатель, 3 - модулятор, 4 - анализатор, 5 - приёмник сигнала с декодером

ствующих, так и стабильностью оптического тракта. Существующие фундаментальные ограничения вызваны дискретностью электрических управляющих сигналов и деформацией, вызванной старением компонентов. В целом, зависимость скорости передачи информации от количества каналов имеет сложный нелинейный характер. При использовании атмосферных оптических линий связи данная зависимость имеет более высокий уровень нелинейности, чем в предыдущем случае. Это вызвано особенностями распространения сигнала в турбулентных средах (в воздухе).

Возможным направлением развития является использование псевдо-квантово-криптографических систем, предложенных автором [6]. Реализация такой системы основана на использовании традиционных каналов связи, как волоконно-оптических, так и атмосферных оптических линий связи. Данная система может корректно работать даже при использовании классической проводной телефонной линии. Выбор типа линии связи определяется только требуемой величиной скорости передачи данных. В качестве «кванта» используется единичный отсчёт аналого-цифрового преобразования сигнала. Основная идея состоит в принудительном зашумлении исходного сигнала (до определённого уровня). При этом на шум накладывается дополнительный сигнал, содержащий информацию о ключе. Данная методика может быть полностью реализована на одночиповом устройстве [7]. На рис. 2 показана оптическая схема модифицированного классического канала связи для работы в соответствии с методом псевдо-квантовой криптографии.

Для повышения ёмкости канала связи могут быть задействованы как старший, так и младший значащие разряды потока оцифрованного сигнала. Без использования специальных декодирующих методов исходный сигнал, содержащий псевдо-квантовую информацию практически неотличим от начального сигнала на приёмной стороне (так как аналоговый сигнал всегда немного зашумлен по причине неоднородности оптической трассы). Также предложена методика использования произвольного размещения битов в выбранные разряды оцифрованного

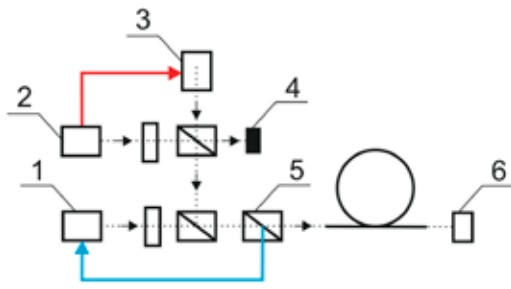


Рис. 2. Архитектура системы, работающей на основе псевдо-квантовой криптографии: 1 – основной лазерный излучатель, 2 и 3 – вспомогательные лазерные излучатели, 4 – фотоприёмник системы управления вспомогательным лазером, 5 – анализатор, 6 – приёмник сигнала с декодером

сигнала. Разработанная схема может применяться и в системах атмосферных оптических линий связи [8].

В последние годы актуальными являются исследования возможностей взлома квантовых каналов связи, причём некоторые результаты являются успешными [3–5]. Данные методики не нарушают фундаментальных физических принципов квантовой механики и основаны как на несовершенстве элементной базы, так и применяемых протоколов.

Разработана оптическая схема повышения точности определения поляризации фотона с вероятностью значительно выше, чем 50%. Сущностью способа является повторяющееся взаимодействие с поляризующими элементами (например, призмы Глана) в направлении распространения луча [6]. Это позволяет определять поляризационные параметры фотона несколько раз. В процессе поглощения фотона фотодетектором информация о его состоянии будет утеряна (поскольку фотон может взаимодействовать с детектором лишь однократно). Но текущее состояние поляризации фотона определяется местоположением детектора, с которым произошло взаимодействие. Отметим, что стопроцентная точность измерения по данной схеме недостижима (потребуется бесконечное число детекторов). Схема разработанного декодера поляризационных параметров фотона представлена на рис. 3. Для улучшения точности измерения поляризационных параметров требуется существенное увеличение количества используемых фотодетекторов.

Поляризаторы различных модулей анализатора могут быть повернуты на различные углы. В частности, для определения поляризации фотона с вероятностью около 75% и угловым ограничением от -45° до $+45^\circ$, необходимо обеспечить двукратное взаимодействие с каждым из поляризаторов. Поляризаторы располагаются под углами 0° , 45° , 90° и 135° , соответственно [6]. При необходимости увеличения вероятности правильного определения поляризационных параметров и увеличения величины углового разрешения, количество поляризаторов и детекторов должно быть значительно увеличено. Это является ограничивающим фактором в данное время, но не является препятствием для разработки системы (струк-

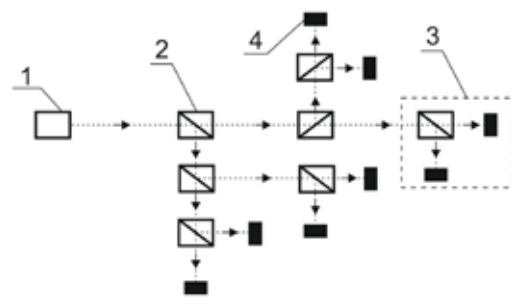


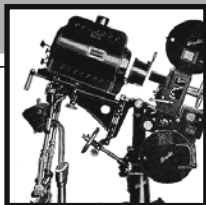
Рис. 3. Схема разработанного декодера поляризационных параметров фотона: 1 – источник излучения (например, торец оптоволокна с коллимирующей оптикой), 2 – призма Глана, 3 – модуль анализатора, включающий в себя два однофотонных детектора, 4 – фотодетектор

туры) в будущем (требуется матричный фотоприёмник, детектирующий единичный фотон). Предложенная методика также может быть использована для улучшения устойчивости квантового канала связи к шумам, либо сопротивления к взлому.

Все разработанные автором системы прошли стадию лабораторных образцов и показали возможность эффективного развития данного направления квантовой криптографии. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. *Bruss D., Luetkenhaus N.* Quantum Key Distribution: From Principles to Practicalities // arXiv:quant-ph/9901061 v2 (1999).
2. *Bennett C.H., Bessette F., Brassard G., Salvail L., and Smolin J.* Experimental quantum cryptography // J. Cryptology 5, 3 (1992).
3. *Y. Zhao, C.-H. F. Fung, B. Qi, C. Chen, and H.-K. Lo,* Quantum hacking: Experimental demonstration of time-shift attack against practical quantum-key-distribution systems // Phys. Rev. A 78, 042333 (2008).
4. *Makarov V.* Controlling passively quenched single photon detectors by bright light // 2009 New J. Phys. 11 065003.
5. *Lydersen L., Makarov V., and Skaar J.* Secure gated detection scheme for quantum cryptography // Phys. Rev. A 83, 032306 (2011).
6. *Biryuchinskiy S., Melnikov K., Melnikov V.* Architecture of multi-channel quantum cryptographic system // IEEE Xplore, ICUMT 2011. – 2011. – ISSN 2157–0221.
7. *Churayev S., Biryuchinskiy S., Melnikov K., Paltashev T.* Phase shift accumulation method for timing characterization // IEEE Xplore, 10.1109/ICP.2011.6106857 – 2011.
8. *Biryuchinskiy S., Melnikov K.* Extra Low Weight FSO System Aiming Laser // IEEE Xplore. – 2010. – P. 803–807 – (Series «ICUMT.2010.5676544»). – ISBN 978-1-4244-7285-7. – ISSN 2157–0221.
9. *Yong-Su Kim, Makarov Vadim, Youn-Chang Jeong, Yoon-Ho Kim.* Silicon Single-Photon Detector with 5 Hz Dark Counts // Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2009), paper JThE103.
10. *Thi Mai Trang Nguyen, Mohamed Ali Sfaxi.* Solange Ghernaoui-H lie, 802.11i Encryption Key Distribution Using Quantum Cryptography // Journal of networks, vol. 1, no. 5, september/october 2006.



ПОДАВЛЕНИЕ ШУМА В ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ на основе контурлет-преобразования

Е. Смирнов, аспирант,
Л.Х. Нурмухамедов, к.т.н.,
СПбГУКИТ



Аннотация

Рассматривается контурлет-преобразование, его возможности для подавления шума в цифровых изображениях, производится сравнение с вейвлет-преобразованием на примере рентгеновского изображения. В качестве метода шумоподавления используется пороговое ограничение коэффициентов преобразования.

Ключевые слова: шумоподавление, контурлет, вейвлет, пороговое ограничение.

DIGITAL IMAGE DENOISING USING CONTOURLET TRANSFORM

E. Smirnov, L. Nurmukhamedov

Abstract

Contourlet transform and its application to image denoising are considered in this paper. Transform coefficient thresholding is used as a denoising method. Efficiency comparison with wavelet transform is performed as well.

Keyword: denoising, contourlet, wavelet, thresholding.

Введение

Цифровые изображения в настоящее время являются неотъемлемой частью нашей жизни. Вследствие различных причин, таких как несовершенство аппаратуры, природные явления, применение алгоритмов компрессии и т.п., качество получаемых изображений снижается. Для его повышения применяется ряд алгоритмов цифровой обработки, ключевыми из которых являются алгоритмы шумоподавления. Подавление шума не только улучшает визуальное восприятие, помогая различить более низкоконтрастные детали изображения, но также является необходимым этапом обработки перед применением различных алгоритмов «машинного зрения».

Изначально алгоритмы шумоподавления оперировали в пространстве изображения [1]. В дальнейшем были разработаны алгоритмы, работающие в пространстве преобразования, например, дискретно-косинусного. Значительное влияние на эту область оказала разработанная в 1980-е годы теория вейвлетов,

послужившая толчком к созданию множества алгоритмов шумоподавления.

В 2005 году Mihn N. Do и Martin Vetterli [2] было предложено контурлет-преобразование, которое развивает идеи вейвлет- и курвлет-преобразований. Базисные функции контурлетов локализованы не только в пространстве и по частоте, но и по направлению, что способствует лучшему выделению контуров на изображении. Эта особенность и дала имя новому преобразованию.

Можно предположить, что для изображений, где основная часть информации заключена в контурах, контурлет-преобразование будет давать выигрыш в шумоподавлении по сравнению с вейвлет-преобразованием. Одним из типов подобных изображений являются изображения цифровой рентгенографии. На сегодняшний день практически нет информации о применении контурлет-преобразования для шумоподавления в рентгеновских изображениях. В данной статье будет рассмотрено применение контурлет-преобразования для подавления шума в тестовом рентге-

новском изображении и проведено сравнение с вейвлет-преобразованием на основе таких параметров, как отношение сигнал-шум и индекс FSIM. Также будут рассмотрены два варианта алгоритмов шумоподавления – жёсткое и мягкое пороговые ограничения коэффициентов и проанализированы результаты их работы при различных параметрах.

Описание принципа контурлет-преобразования

Схема контурлет-преобразования изображена на рис. 1. Вначале входное изображение раскладывается на низкочастотную и высокочастотную части, называемые, соответственно, аппроксимирующим и детализирующим изображениями. Частотное разложение производится при помощи пирамиды Лапласа (блок LP – Laplacian Pyramid на рис. 1), предложенной в 1983 г. Burt и Adelson [3]. Принцип разложения в пирамиду состоит в том, что низкочастотная часть получается в результате сглаживания исходного изображения при помощи какого-либо фильтра (часто используется размытие по Гауссу, билатеральная фильтрация и т. п.), а высокочастотная находится как разность между исходным изображением и низкочастотным. Более подробно про пирамиду Лапласа и методы её вычисления для контурлет-преобразования можно найти в [3].

На рис. 1 прямоугольники на выходе пирамиды Лапласа представляют собой двумерный спектр изображения. Таким образом, прямоугольник с закрашенной внутренней частью соответствует низкочастотному изображению, а с закрашенной внешней – высоким частотам.

Описанное преобразование напоминает собой вейвлет-преобразование, но отличается от него тем, что в пирамиде Лапласа присутствует неявная передискретизация, за счёт чего формируется некоторая избыточность преобразования (до 33% [2]). Из преимуществ пирамиды Лапласа перед вейвлет-преобразованием можно отметить то, что в результате фильтрации получается лишь одно высокочастотное изображение, которое, к тому же, не подвержено наложению спектров, т. к. высокочастотная часть не децимируется.

Далее, высокочастотная часть изображения поступает на вход банка направленных фильтров, а низкочастотная прореживается в 2 раза по обеим координатам, после чего служит входным изображением для следующей итерации алгоритма.

Банк направленных фильтров (блок DFB – Directional Filter Bank) служит для группировки высокочастотных коэффициентов преобразования по некоторому количеству направлений. Для разбиения частотной плоско-

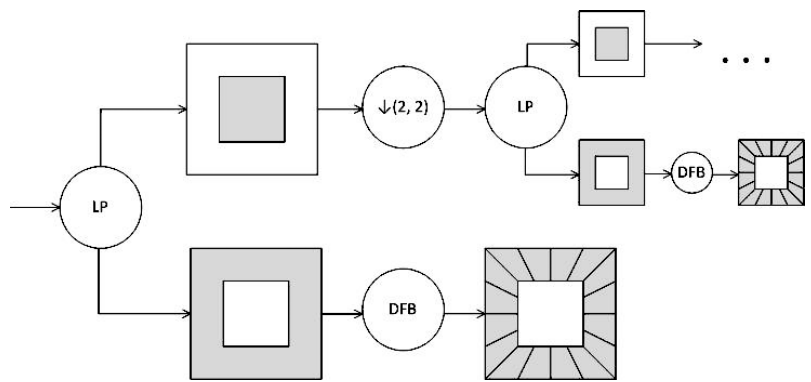


Рис. 1. Схема контурлет-преобразования

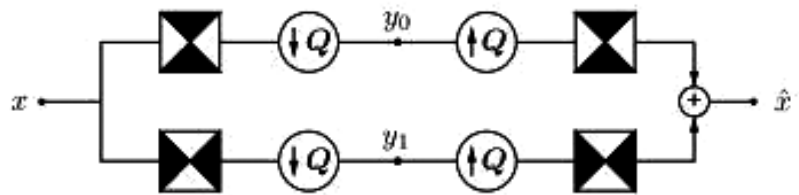


Рис. 2. Блок направленных фильтров



Рис. 3. Операция сдвига изображения

сти на l полос таким образом, как показано на рис. 1, используется банк квинканкс-фильтров [4, 5], представляющих собой обобщение принципа квадратурно-зеркальных фильтров на многомерный случай. Эти фильтры могут иметь только два варианта полосы пропускания (рис. 2) – в горизонтальном или вертикальном направлении. Для получения большего числа полос применяется операция сдвига изображения, проиллюстрированная на рис. 3.

Численные эксперименты

Моделирование шумоподавителя производилось в системе Matlab. В качестве тестового изображения использовался реальный рентгеновский снимок, полученный с рентгенодиагностического аппарата производства ЗАО «НИПК Электрон». К снимку был добавлен шум, распределённый по нормальному закону со среднеквадратическим отклонением 3σ , где σ^2 – дисперсия исходного изображения.

Вначале было произведено сравнение шумоподавления при работе в пространствах контурлет-преобразования и вейвлет-преобразования. Для расчёта коэффициентов контурлет-преобразования были использованы исходные коды алгоритма, предоставленные авторами метода [7].

Было использовано 5 уровней разложения пирамиды Лапласа. Для каждого уровня разложения было выбрано определённое количество полос направленного преобразования, которое составило от пяти для самой высокочастотной части до 0 в низкочастотной. Для вейвлет-преобразования было выбрано также 5 уровней разложения при помощи вейвлета Козна-Добеши-Фово (КДФ 9/7). Существует множество алгоритмов шумоподавления, работающих в пространстве вейвлет-преобразования, однако в рамках данной статьи будет рассмотрен только один из них – пороговое ограничение коэффициентов, впервые предложенный Donoho и Johnstone [6]. Его принцип заключается том, что коэффициенты преобразования, меньшие по модулю некоторого порога, считаются шумовыми и приравниваются к нулю.

$$\begin{aligned} G(w) &= 0, w < T \\ G(w) &= w, w \geq T, \end{aligned} \quad (1)$$

где $G(w)$ – значение коэффициентов после ограничения.

Величина порога T , как правило, представляет собой функцию от дисперсии коэффициентов изображения. В данном случае был выбран порог $T=3\sigma$.

Для оценки степени шумоподавления было выбрано два параметра. Первый из них – отношение сигнал-шум (ОСШ), широко распространённый, однако слабо коррелирующий с визуальным восприятием изображения человеком параметр, вследствие чего недостаточно учитываются такие факторы, как, например, внесение артефактов при шумоподавлении [9]. Из-за упомянутого недостатка разрабатываются иные метрики для оценки качества изображений, обзор которых дан в [10]. Одной из наиболее совершенных на сегодняшний день является метрика FSIM (feature similarity index) [11]. Данная метрика показывает схожесть двух изображений – в данном случае, исходного незашумленного и изображения после обработки шумоподавлятелем. Диапазон допустимых значений индекса составляет от 0 до 1, где 1 соответствует полной идентичности изображений. Исходный код для расчёта предоставлен автором [12] и был использован.

На рис. 4а приведено исходное рентгеновское изображение кисти руки человека, а на рис. 4б – с аддитивным гауссовским шумом, при этом отношение сигнал-шум (ОСШ) составляет 9,54 дБ, FSIM=0,9697. Рис. 4в – пороговое ограничение на основе вейвлет-преобразования, ОСШ=19,84 дБ, FSIM=0,9888, рис. 4г – пороговое ограничение на основе контурлет-преобразования, ОСШ=21,46 дБ, FSIM=0,9901.

Оба алгоритма обеспечивают удовлетворительную степень шумоподавления, подавляя шум более, чем на 10 дБ, при этом контурлет-преобразование показывает результат на 2 дБ лучше. Рассмотрим увеличенные участки изображений после шумоподавления по обоим методам. Можно заметить, что оба алгоритма вносят в исходное изображение искажения, при этом артефакты при вейвлет-преобразовании (рис. 5а) более заметны на глаз, что отражено и в величине индекса FSIM.

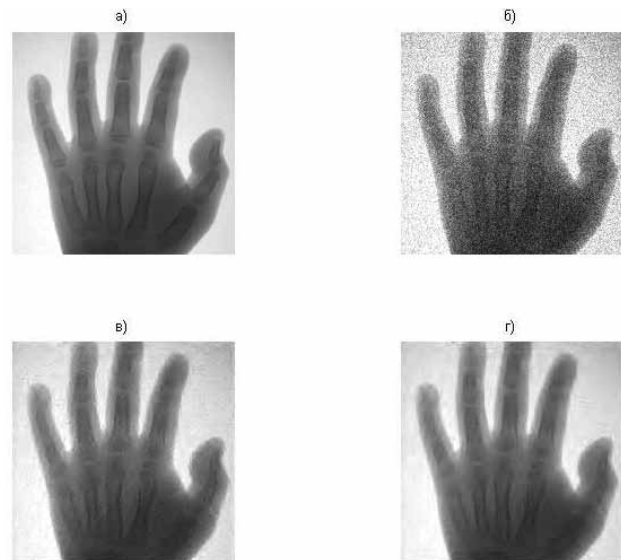


Рис. 4. Рентгеновское изображение кисти руки



Рис. 5. Увеличенный фрагмент изображения после шумоподавления

На внесение артефактов при выборе данного алгоритма шумоподавления будет влиять, прежде всего, выбор порога ограничения. При выборе высокого порога вместе с шумовыми коэффициентами будут отсечены значащие коэффициенты сигнала, что и приведёт к возникновению артефактов. С другой стороны, слишком низкий порог оставит значительную часть шумовых коэффициентов, что также приведёт к снижению качества результирующего изображения. На рис. 6 и 7 приведена зависимость качественных метрик от величины порога шумоподавления, выраженного относительно σ . Из рисунков видно, что оптимальное значение параметра σ , по обоим метрикам, составляет около трёх. При этом также можно заметить, что индекс FSIM сильнее реагирует на появление артефактов в изображении, чем ОСШ, т.к. при росте σ , а следовательно и артефактов, он убывает быстрее, чем ОСШ.

Помимо жёсткого порогового ограничения, на практике также часто встречается мягкое, которое, как правило, позволяет добиться меньшего количества артефактов при шумоподавлении [8].

$$\begin{aligned} G(w) &= \alpha w, w < T \\ G(w) &= w, w \geq T, \end{aligned} \quad (2)$$

где $0 \leq \alpha \leq 1$. Случай $\alpha=0$ соответствует жёсткому ограничению, а $\alpha=1$ – отсутствию шумоподавления.

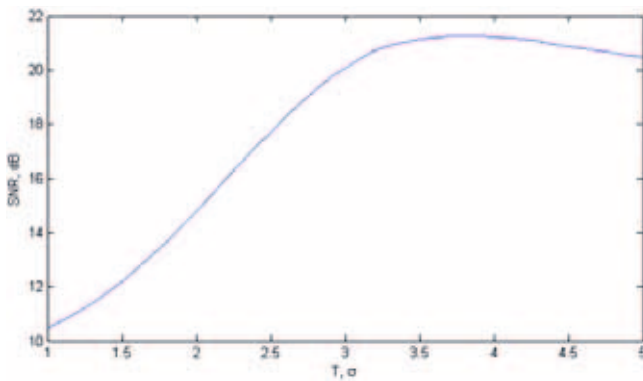


Рис. 6. Зависимость качественных метрик от величины порога шумоподавления

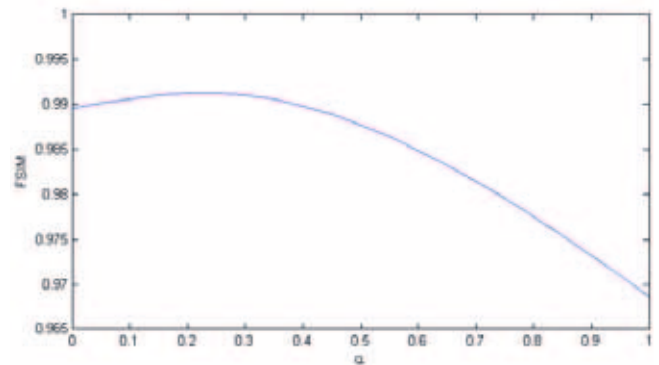


Рис. 8. Зависимость качественных метрик от выбора коэффициента α

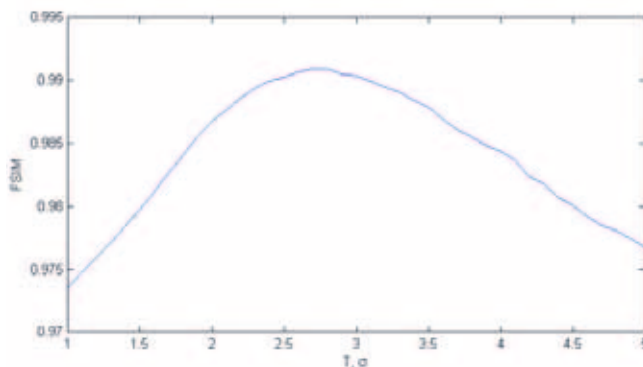


Рис. 7. Зависимость качественных метрик от величины порога шумоподавления

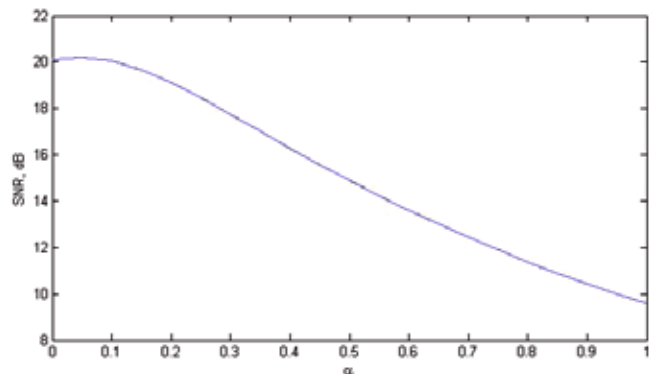


Рис. 9. Зависимость качественных метрик от выбора коэффициента α

На рис. 8 и 9 приведены зависимости качественных метрик от выбора коэффициента α .

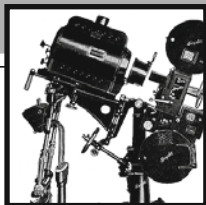
Из графика зависимости FSIM видно, что, несмотря на некоторое понижение в отношении сигнал-шум, выбор мягкого ограничения с $\alpha \approx 0,25$ позволяет добиться несколько лучшего качества шумоподавления.

Заключение

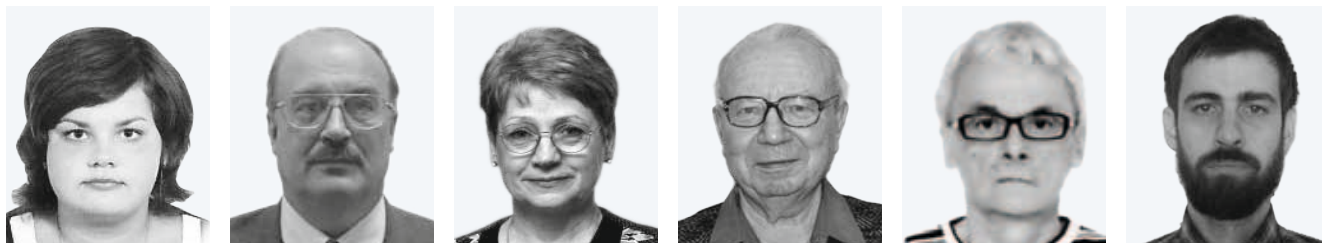
Таким образом, можно заключить, что контурлет-преобразование является подходящим преобразованием для изображений, где основная часть информации заключена в контурах, так как обеспечивает высокую степень шумоподавления, а также небольшое число внесённых искажений, по сравнению с вейвлет-преобразованием. Однако ничуть не меньшую роль для обеспечения качества шумоподавления играет выбор подходящего алгоритма обработки коэффициентов преобразования. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. *Brailan J.C.* et al. Noise reduction filters for dynamic image sequences: a review // Proceedings of the IEEE. – 1995. – Т. 83. – №. 9. – С. 1272–1292.
2. *Do M.N., Vetterli M.* The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation // Image Processing, IEEE Transactions on. – 2005. – Т. 14. – №. 12. – С. 2091–2106.
3. *Burt P., Adelson E.* The Laplacian pyramid as a compact image code // Communications, IEEE Transactions on. – 1983. – Т. 31. – №. 4. – С. 532–540.
4. *Do M.N.* «Directional multiresolution image representations», Ph.D. dissertation, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland, December, 2001.
5. *Vetterli M.* «Multidimensional subband coding: Some theory and algorithms», Signal Proc., vol. 6, no. 2, pp. 97–112, February, 1984.
6. *Donoho D. and Johnstone I.* Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage, Biometrika 81, 425–455, (1994).
7. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/8837-contourlet-toolbox>
8. *Меркурьев С.В.* Методы подавления шума цифровых рентгенограмм // Биотехносфера. – 2010. – №. 4.
9. *Winkler S., Mohandas P.* The evolution of video quality measurement: from PSNR to hybrid metrics // Broadcasting, IEEE Transactions on. – 2008. – Т. 54. – №. 3. – С. 660–668.
10. *Zhang L.* et al. A comprehensive evaluation of full reference image quality assessment algorithms // Image Processing (ICIP), 2012 19th IEEE International Conference on. – IEEE, 2012. – С. 1477–1480.
11. *Zhang L.* et al. FSIM: a feature similarity index for image quality assessment // Image Processing, IEEE Transactions on. – 2011. – Т. 20. – №. 8. – С. 2378–2386.
12. <http://www4.comp.polyu.edu.hk/~cslzhang/IQA/FSIM/FSIM.htm>



КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СИНТЕЗ ОДНОМЕРНЫХ МИКРОГОЛОГРАММ ФУРЬЕ для оптико-голографической памяти



А.С. Подгородняя, аспирантка, С.Б. Одинокоев, д.т.н., Н.М. Вереникина, к.т.н., В.И. Бобринев, к.ф.-м.н., А.Ю. Бетин, МГТУ им. Н.Э. Баумана; Е.Ю. Злоказов, к.ф.-м.н., НИЯУ «МИФИ»

Аннотация

Представлен метод компьютерного синтеза голограмм Фурье. Показаны преимущества метода. Проанализирован дополнительный фазовый фильтр, необходимый для сглаживания спектра фурье-голограмм. Проведён анализ влияния фильтра на характеристики пространственно-частотного спектра.

Ключевые слова: одномерная голограмма Фурье, компьютерный синтез, пространственно-временной модулятор света.

COMPUTER MODELING AND SYNTHESIS OF ONE-DIMENSIONAL FOURIER MICROHOLOGRAMS FOR OPTICAL HOLOGRAPHIC MEMORY

A. Podgorodnyaya, S. Odinkov, N. Verenikina, E. Zlokazov, V. Bobrinev, A. Betin

Abstract

A method of computer generation of Fourier holograms is presented. Advantages of a method are shown. The analysis of characteristics of the additional phase filter, which is necessary for smoothing of a range of Fourier holograms, is carried out. Influence of the filter on characteristics of the spatial-frequency range is analyzed.

Keywords: one-dimensional Fourier hologram, computer synthesis, spatially temporal light modulator.

■ В современном кинематографе широко используются цифровые методы записи-считывания видеoinформации, в том числе, на оптические DVD-диски, эффективность которых ограничена теоретически достижимой плотностью записи [1]. Новое поколение

голографических дисков для оптической памяти позволяет значительно увеличить плотность записи информации и информационную ёмкость дисков довести до 500–600 ГГБ [1], а по сообщениям компании InPhase, вплоть до 1 ТБ [2].

В разрабатываемых схемах ОГП наиболее перспективным направлением является повышение информационной ёмкости и упрощение техники реализации, уход от традиционных голографических схем. В этой связи разработка проекционного метода получения микроголограмм Фурье (МГФ) [3] для ОГП является актуальной. Синтезированная на компьютере голограмма вводится в оптическую схему с помощью пространственно-временного модулятора света (ПВМС) и записывается на голографический носитель. Компьютерный синтез МГФ для ОГП позволяет математически удалить нулевой порядок, провести фазовое кодирование опорных объектов и ограничить динамический диапазон записываемого изображения, что приводит к значительному упрощению оптической системы записи голограммы [3] и позволяет использовать мультиплексирование, которое позволяет повысить информационную ёмкость. При компьютерном синтезе МГФ важнейшим элементом является процесс кодирования страницы входных данных с помощью фазовой маски [3], а для определения параметров МГФ важна оценка влияния геометрических параметров ПВМС на параметры пространственно-частотного спектра (ПЧС).

В данной статье анализируется распределение комплексных амплитуд светового поля в плоскости восстановленного с МГФ изображения в зависимости от параметров фазовой маски и ПВМС. В случае проекционного метода записи синтезированных на компьютере МГФ основной причиной ограничения информационной ёмкости является ограничение разрешающей способности ПВМС. Если рассчитанная МГФ обладает большей размерностью, чем ПВМС, то её часть, соответствующая высшим частотам ПЧС, будет отсечена. Оптимизация оптической системы получения МГФ позволяет уменьшить шумовую составляющую, появляющуюся при перекрывании дифракционных порядков в спектре записываемого изображения и, тем самым, увеличить информационную ёмкость.

Компьютерный синтез микроголограммы Фурье

При расчёте МГФ в предметной плоскости задаются функция $h(x_i, y_i)$, описывающая страницу входных данных, смещённая относительно оптической оси на величину Δ вдоль оси O_{x1} , и амплитуда опорного пучка в виде δ -функции в центре по оптической оси. В результате коэффициент пропускания МГФ имеет следующий вид [2]:

$$\tau(x_f, y_f) \sim I(x_f, y_f) = [C_{ref} + H_R \exp(-i2\pi\Delta x_f)]^2 = C_{ref}^2 + |H_R|^2 + C_{ref}^* H_R \exp(-i2\pi\Delta x_f) + C_{ref} H_R^* \exp(i2\pi\Delta x_f) \quad (1)$$

где H_R – фурье-образ функции $h(x, y)$; C_{ref} – фурье-образ δ -функции опорного пучка; (x_i, y_i) – координата фурье-плоскости.

При восстановлении МГФ в плоскости восстановленного изображения (x_2, y_2) получим распределение, про-

порциональное фурье-образу коэффициента пропускания МГФ, а именно:

$$T_{out}(x_2, y_2) = \tilde{F}[\tau(x_f, y_f)] \sim \tilde{F}[C_{ref}^2] + \tilde{F}[H_R^* H_R] + C_{ref} \tilde{F}[H_R \exp(-i2\pi\Delta x_f)] + H_R^* \exp(i2\pi\Delta x_f) \sim \delta(x_2, y_2) + \frac{1}{C_{ref}} \tilde{F}[H_R^*(v_x, v_y) H_R(v_x, v_y)] + h_R(x_2 + \Delta, y_2) + h_R^*(-x_2 - \Delta, -y_2). \quad (2)$$

Член $|H_R|^2$ в выражении (1) приводит к появлению мешающей автокорреляционной компоненты в центре восстановленного поля согласно выражению (2). При расчёте МГФ этим членом можно пренебречь. В результате получим формулу для расчёта коэффициента пропускания МГФ

$$\tau(x_f, y_f) = C + 2Re[H_R \exp(-i2\pi\Delta x_f)], \quad \tau(x_f, y_f) \geq 0 \quad (3)$$

где C – постоянная величина.

Кодирование страницы входных данных с помощью фазовой маски

В компьютере в соответствии с выбранной математической моделью синтезируется двумерная структура (рис. 1), состоящая из реперов и точек, где два бита каждой строки резервируются на управляющий символ (репер). С помощью алгоритма БПФ для каждой отдельно выделенной строки формируется одномерная компьютерно-синтезированная голограмма Фурье (1D – КСГФ), поскольку двумерная КСГФ исключает возможность использования метода мультиплексирования.

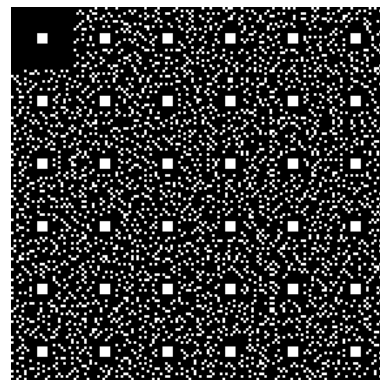


Рис. 1. Синтезируемая двумерная структура

В случае, если коэффициент пропускания транспаранта со страницей входных данных $\tau(x, y)$ задаётся дискретно, в виде матрицы $\tau(k, l)$ отсчётов с шагом дискретизации $\Delta x, \Delta y$ [4], то имеем:

$$\tau(x, y) = \sum_{k=0}^{N_x} \sum_{l=0}^{N_y} \tau(k, l) \delta(x - \Delta x, y - \Delta y), \quad (4)$$

где N_x, N_y – число отсчётов, определяемое размерами исходного объекта A, B

$$N_x = \frac{A}{\Delta x}, \quad N_y = \frac{B}{\Delta y}. \quad (5)$$

Если шаг дискретизации $\Delta x, \Delta y$ удовлетворяет условию

$$\Delta x = \frac{1}{2\nu_{x \max}}, \quad \Delta y = \frac{1}{2\nu_{y \max}}, \quad (6)$$

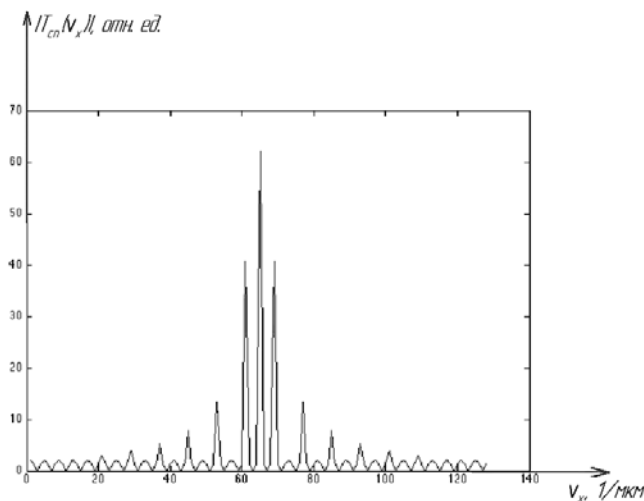


Рис. 2. График распределения (7) (одномерный случай)

где $2\nu_{x \max}$, $2\nu_{y \max}$ – размеры ПЧС страницы входных данных, то матрица отсчётов $\tau(k, l)$ полностью определяет исходную непрерывную функцию $\tau(x, y)$. Тогда для дискретного объекта (4) распределение комплексных амплитуд в плоскости МГФ имеет вид:

$$T_{cn}(\nu_x, \nu_y) = \sum_{k=0}^{N_x-1} \sum_{l=0}^{N_y-1} \tau(k, l) \exp \left[i2\pi \left(k \frac{\nu_x}{2\nu_{x \max}} + l \frac{\nu_y}{2\nu_{y \max}} \right) \right]. \quad (7)$$

На рис. 2 показан график распределения модуля комплексной амплитуды МГФ (7) от пространственной частоты ν_x . Как видно из рис. 2, распределение модуля комплексной амплитуды имеет большой динамический диапазон, для «сглаживания» которого на страницу входных данных накладывают кодирующую фазовую маску (КФМ) (рис. 3).

Шаг КФМ включает число пикселей объекта на один элемент маски и в общем случае может быть разным, но кратным шагу квантования объекта, а величина шага КФМ влияет на точность восстановления мелких элементов. Влияние шага и структуры КФМ на качество изображения страницы входных данных, восстановленного с МГФ, проиллюстрировано на рисунках 4 а, б, в.

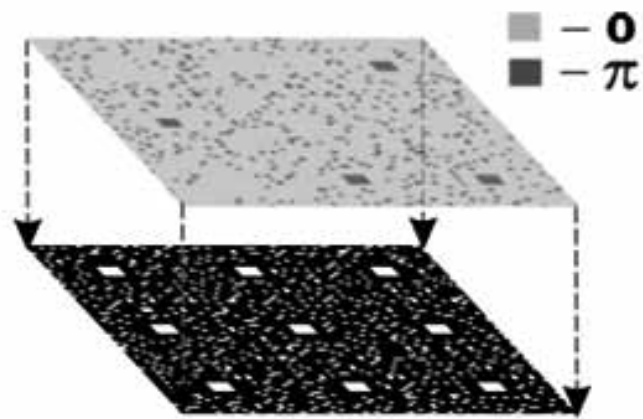


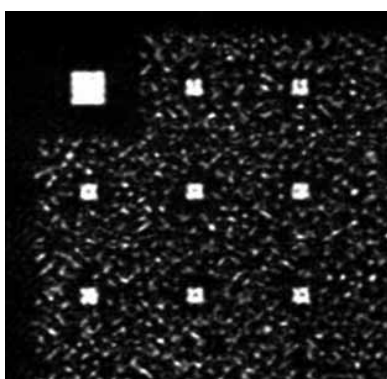
Рис. 3. Вид КФМ, накладываемой на страницу входных данных

Эксперименты также показали [3], что при уменьшении шага фазовой маски до величины, меньшей размера самого малого элемента записываемого объекта, происходит резкое снижение точности восстановления голограммы.

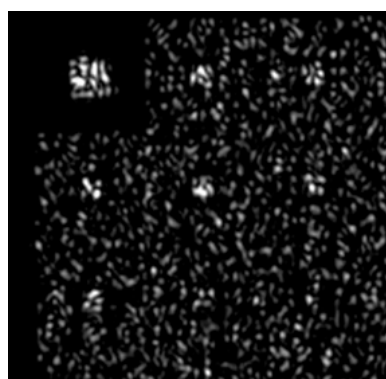
Оценка влияния ограничения пространственно-частотного спектра микроголограммы Фурье при выводе на пространственно-временной модулятор света

1D-компьютерно-синтезированная фурье-голограмма в виде ровных сигналов выводится на жидкокристаллический пространственно-временной модулятор света (ЖК-ПВМС) и занимает всю его строку. С точки зрения избыточности информации и минимизации ошибок (погрешностей) такая же информация записывается и на вторую строку ПВМС (по вертикали занимают две строки). То есть в расчётах строки дублируются, строки i и $i+1$ идентичны (для них одинаковые фазовые маски, содержат одинаковую информацию).

Теперь, учитывая то, что структура ЖК имеет электроды, и по горизонтали электродная структура будет накладываться на одномерную голограмму Фурье, из-



4а



4б



4в

Рис. 4. а – восстановленное изображение страницы входных данных без наложения КФМ; б – восстановленное изображение страницы входных данных при наложении КФМ без использования алгоритма расчёта фазового распределения; в – восстановленное изображение страницы входных данных при наложении КФМ с шагом 1 пиксель

бавляются от электродной структуры, используя оптическую фильтрацию.

Выполняя БПФ от произведения коэффициентов пропускания страницы входных данных и КФМ, получаем зависимость спектра $F\{\tau_{БХ} \times \tau_{ФМ}\}$ от частот ν_x, ν_y , которая хранится в оперативной памяти компьютера. Необходимо учитывать, что частоты такого спектра должны чётко соотноситься с распределением страницы исходных данных по координатам. Проводится ещё одна принудительная дискретизация спектра, так как ПВМС имеет свою структуру (габариты и шаг). Тогда объект может быть представлен матрицей отсчётов $\{F_{\tau}(r, s)\}$ на прямоугольном растре с шагом по координатам $\Delta\nu_x, \Delta\nu_y$ [4]

$$T_{cn}(\nu_x, \nu_y) = \sum_{r=0}^{M_x-1} \sum_{s=0}^{M_y-1} \sum_{k=0}^{N_x-1} \sum_{l=0}^{N_y-1} \tau(k, l) \exp \left[i2\pi \left(kr \frac{\Delta\nu_x}{2\nu_{x \max}} + ls \frac{\Delta\nu_y}{2\nu_{y \max}} \right) \right] \cdot \delta(\nu_x - r\Delta\nu_x, \nu_y - s\Delta\nu_y), \quad (8)$$

где M_x, M_y – размерность ПВМС.

Для $\Delta\nu_x, \Delta\nu_y, M_x, M_y$ должны выполняться соотношения

$$\Delta\nu_x = \frac{1}{A}, \Delta\nu_y = \frac{1}{B}, M_x = \frac{2\nu_{x \max}}{\Delta\nu_x}, M_y = \frac{2\nu_{y \max}}{\Delta\nu_y}. \quad (9)$$

Если выполняется условие $N_x=M_x, N_y=M_y$, то получим выражение для вычисления значений элементов матрицы после второй дискретизации по элементам матрицы исходного объекта:

$$T_{cn}(r, s) = \sum_{k=1}^{N_x-1} \sum_{l=0}^{N_y-1} \tau(k, l) \exp \left[i2\pi \left(\frac{kr}{N_x} + \frac{ls}{N_y} \right) \right]. \quad (10)$$

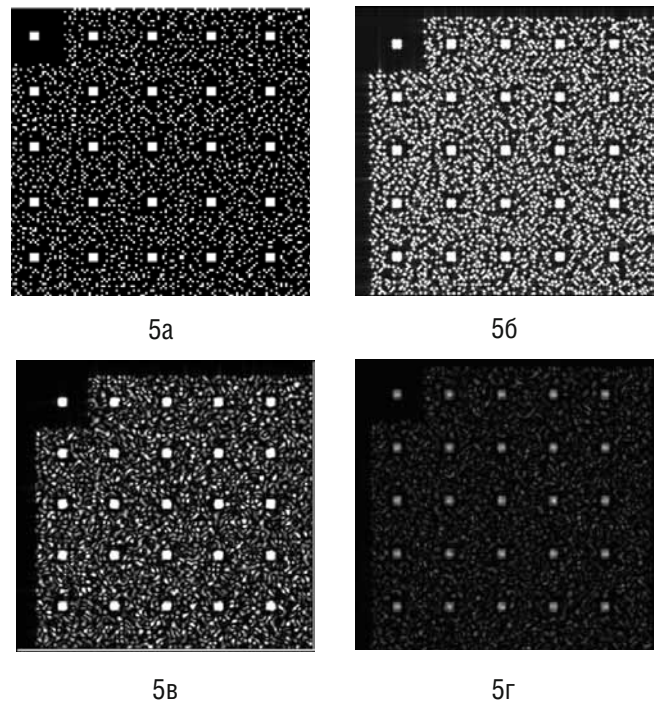


Рис. 5. а – элемент страницы голографической памяти; б – элемент, численно восстановленный с голограммы размерности 1536x2048 после её урезания до размерности модулятора; в – элемент, численно восстановленный с голограммы размерности 2304x3072 после её урезания до размерности модулятора; г – элемент, численно восстановленный с голограммы размерности 2304x3072 после её урезания до размерности модулятора (увеличенный размер элемента фазовой маски)

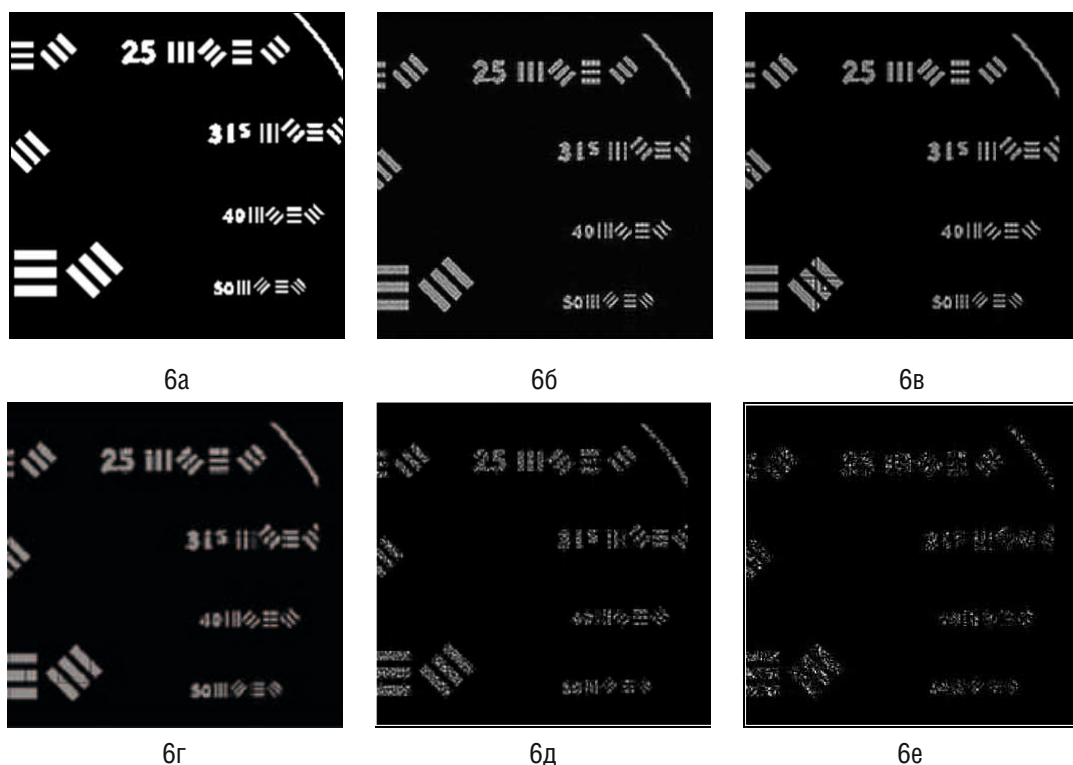


Рис. 6. а – тестовый объект; б – е – восстановленные объекты при различных значениях шага случайной фазовой маски (б – без маски; в – 50 пикселей; г – 10 пикселей; д – 2 пикселя; е – 1 пиксель)

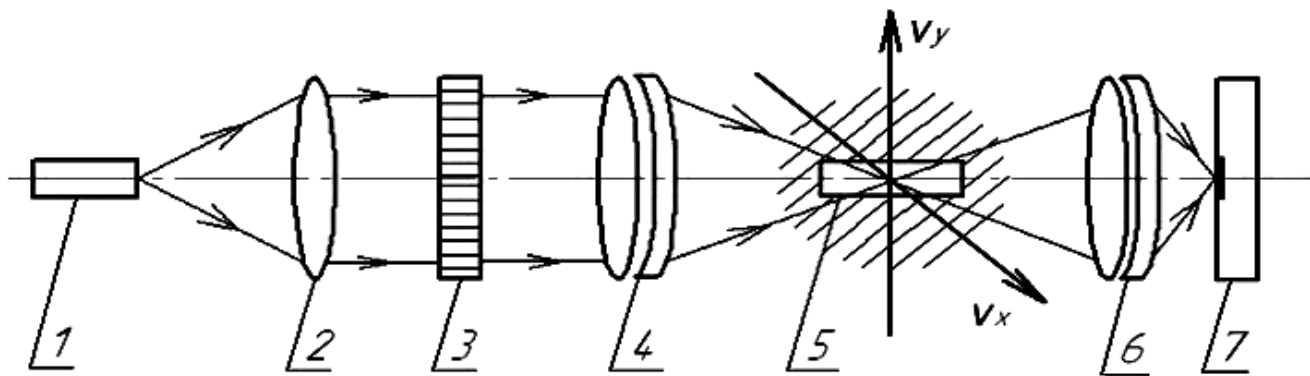


Рис. 7. Оптическая схема: 1 – лазер; 2 – осветительный объектив; 3 – ПВМС; 4 – фурье-преобразующий объектив; 5 – диафрагма; 6 – фурье-синтезирующий объектив; 7 – регистрирующая среда (голографический диск)

Выражение (10) является идеальным случаем. Такой же подход позволяет смоделировать неидеальный случай, когда $N_x \neq M_x$, $N_y \neq M_y$.

Увеличение количества информации, записанной на голограмму, приводит к увеличению размера самой голограммы. Поскольку возможность используемого для вывода голограммы пространственного модулятора ограничена его размерностью, то при реализации МГФ большего размера её часть, соответствующая высокочастотным элементам пространственного спектра, будет отсечена. Подобное искажение голограммы приводит к расплыванию границ элементов записываемого объекта, что может сказаться при считывании восстановленного объекта. Подобное «урезание» в значительной степени может

сказаться на точности восстановления мелких элементов записанного объекта, размерность которых 1–2 пикселя. На рис. 5а и 5б представлен элемент объекта, записанного на голограмму размером 1536x2048, и фрагмент, численно восстановленный с этой же голограммы после её ограничения модулятором размером 768x1024 (в 2 раза).

Увеличение размерности рассчитанной МГФ до 2304x3072 при использовании того же модулятора (размерностью в 3 раза меньше) привело к расплыванию границ мелких элементов объекта, восстановленного с голограммы после её урезания, вплоть до их слияния и потери читаемости объекта (рис. 5в). Использование фазовой маски с увеличенным размером пикселя (1 пиксель маски на 4 элемента тестового объекта) также не дало положительных результатов (рис. 5г).

Расчёты МГФ с добавлением фазовых масок с разным шагом (количество пикселей объекта на один элемент маски) показали, что выбор шага маски также влияет на точность восстановления мелких элементов при «урезании» голограммы до размерности модулятора. На рис. 6 представлены результаты расчётов для голограммы размерностью 16x1152 при её урезании до размерности модулятора 1024x768 (в 1,5 раза). Видно, что при снижении шага фазовой маски до величины, меньшей размера самого малого элемента записываемого объекта, происходит резкое снижение точности восстановления. В этом случае наблюдалось расщепление реперных точек из-за неоднородности значения фазового множителя элементов в пределах одного репера. Стоит также отметить, что при снижении шага фазовой маски наблюдалось снижение отношения интенсивностей нулевого и ± 1 дифракционных порядков.

Оптическая система получения микроголограммы Фурье

На рис. 7 показана оптическая схема устройства записи компьютерно-синтезированных МГФ на регистрирующую среду методом проекции с помощью лазера (рис. 7, поз. 1) и осветительного объектива (рис. 7, поз. 2), формирующего однородную плоскую волну.

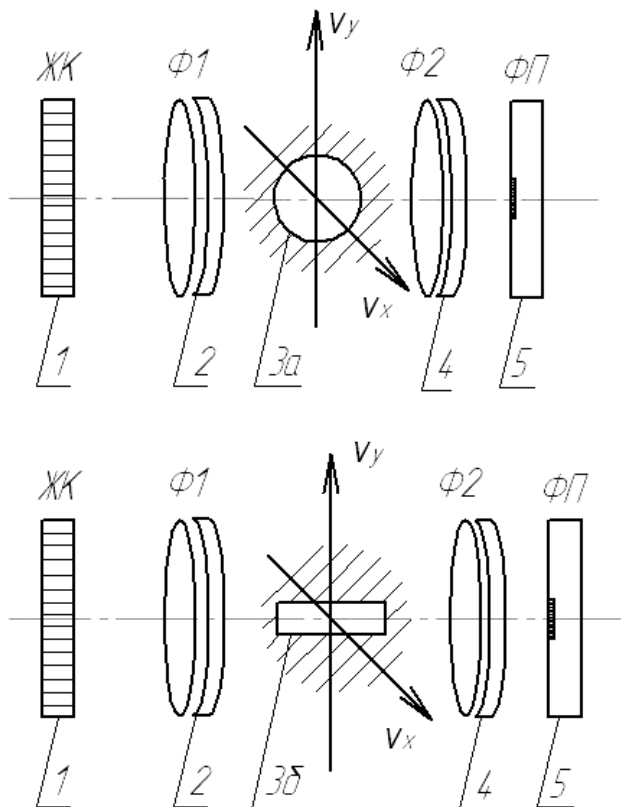


Рис. 8. Принципиальная оптическая схема фильтрации

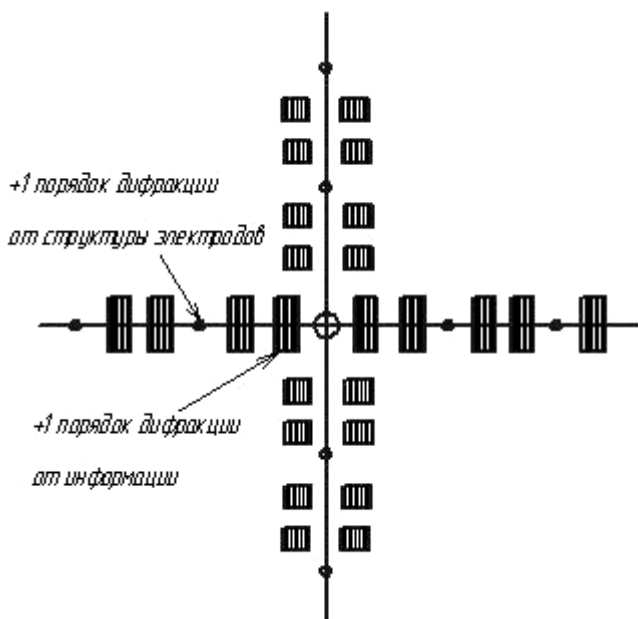


Рис. 9. Спектр МГФ до фильтрации

При освещении плоской волной ПВМС (рис. 8, поз. 1), в качестве которого используется жидкокристаллический экран с электродной структурой, в фокальной плоскости фурье-преобразующего объектива (рис. 8, поз. 2) получаем двумерный ПЧС МГФ, выведенной на ПВМС, с множеством неинформативных порядков дифракции (рис. 9). Спектр представляет собой совокупность полос: каждый восстановленный px изображения размывается в полосу. Вокруг каждого порядка дифракции от структуры ПВМС происходит «размножение» информации (сумма $comb$) на структуре электродов, что отрицательно влияет на восстановление поля.

Поскольку пространственный спектр структуры ПВМС находится в более высокочастотной области ПЧС, чем информативные низшие порядки дифракции, то имеется возможность отсеять спектр, формируемый структурой модулятора, с помощью пространственного фильтра, установленного в фокальной плоскости объектива, и тем самым исключить проекцию структуры электродов на регистрирующую среду (рис. 8, поз. 5).

Восстановленное поле будет зависеть от формы фильтра (рис. 8). Помимо фильтрации в горизонтальной плоскости, необходима фильтрация и в вертикальной, чтобы также исключить влияние структуры электродов. В соответствии с принятой математической моделью решения поставленной задачи информация по вертикальной координате не нужна, следовательно, в восстановленном поле изображения фильтрацию можно производить круглой или щелевой диафрагмой. При фильтрации круглой диафрагмой (рис. 8, поз. 3а) вырезаются нулевой и два первых порядка дифракции (нулевой порядок – опорный луч), отсекая высшие частоты, что приводит к размыванию битов информации в строке и их частичное наложение друг на друга, снижается качество голограммы. Поэтому

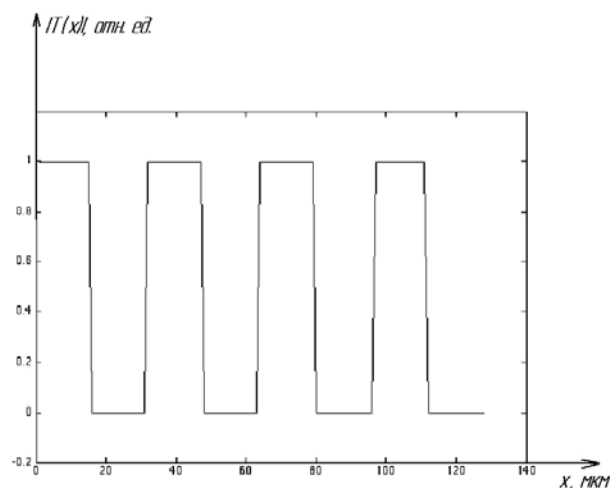


Рис. 10. Сигнал на выходе ПВМС

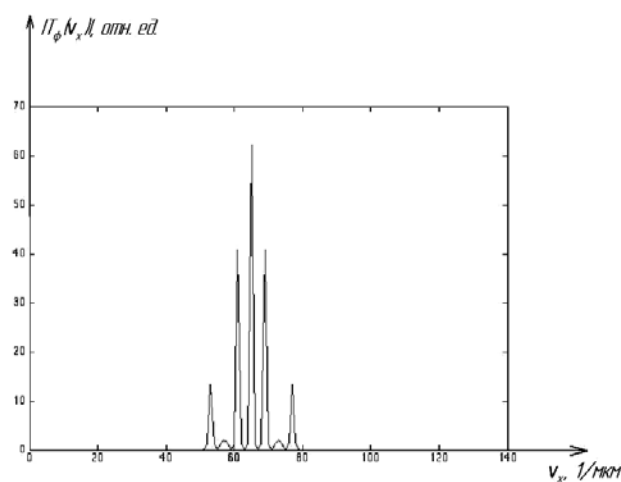


Рис. 11. Отфильтрованный ПЧС

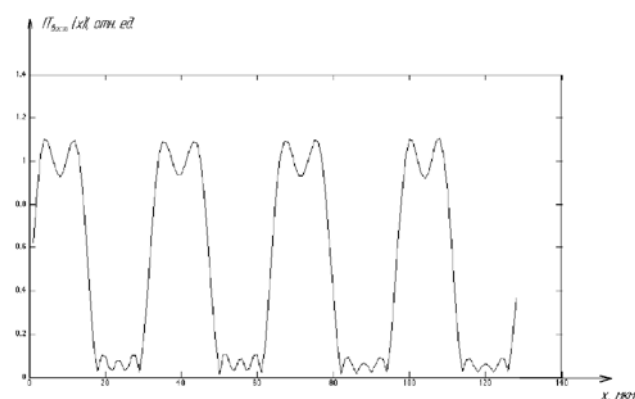


Рис. 12. Восстановленный сигнал

оптимальной будет щелевая диафрагма, показанная на рис. 8, поз. 3б.

Проанализируем процесс фильтрации бинарной периодической структуры светового поля, формируемой ПВМС при освещении однородной плоской волной амплитудой T_0 (рис. 10),

$$T(x, y) = T_0 \sum_i^N \sum_j^M \text{rect}\left(\frac{x-x_i}{a}, \frac{y-y_j}{b}\right) \text{rect}\left(\frac{x-aM}{2aM}, \frac{y-bN}{2bN}\right), \quad (11)$$

где a, b – размеры ячейки ПВМС; M, N – количество ячеек ПВМС по горизонтали и вертикали.

Тогда в фокальной плоскости фурье-преобразующего объектива (рис. 8, поз. 4) будем иметь распределение модуля комплексной амплитуды

$$|T_{cn}(v_x, v_y)| = 2abNM \operatorname{sinc}(2\pi Nbv_x) \operatorname{sinc}(2\pi Mav_y) \frac{\cos\pi(bv_x + av_y)}{\cos(\pi bv_x) \cos(\pi av_y)} \quad (12)$$

Найдём величину и положение максимумов нулевого и \pm первого порядков дифракции

$$|T_{cn}(v_x, v_y)|_{\max} = 2abNM \text{ при } v_x = 0, v_y = 0 \quad (13)$$

$$|T_{cn}(v_x, v_y)|_{\max} = \frac{8abNM}{\pi^2} \text{ при } v_x = \pm \frac{1}{2a}, v_y = \pm \frac{1}{2b} \quad (14)$$

С помощью щелевого фильтра размером $|v_{xy}| \geq \frac{1}{2a}, |v_{yx}| \geq \frac{1}{2b}$ вырезаем информативную часть ПЧС (рис. 11)

$$|T_{\phi}(v_x, v_y)| = 2abNM \operatorname{sinc}(2\pi Nbv_x) \operatorname{sinc}(2\pi Mav_y) \frac{\cos\pi(bv_x + av_y)}{\cos(\pi bv_x) \cos(\pi av_y)} \operatorname{rect}\left(\frac{v - v_{xy}}{a}, \frac{v - v_{yx}}{b}\right) \quad (15)$$

В результате восстановленный входной сигнал после фурье-синтезирующего объектива (рис. 7, поз. 6) в плоскости регистрирующей среды (рис. 7, поз. 7) будет иметь вид, представленный на рис. 12.

Одновременно с фильтрацией оптическая система выполняет функцию переноса информации, выведенной на ПВМС, с уменьшением в 30..60х в плоскость голографического диска (рис. 7, поз. 7). И таким образом, в плоскости голографического диска регистрируется МГФ без искажений структурой ПВМС.

На голографический диск диаметром 130 мм, при использовании в качестве ПВМС жидкокристаллического экрана Sony LCX017DLT с разрешением 1024x768 пикселей и лазера с длиной волны излучения $\lambda=630$ нм, с помощью разработанной системы памяти можно записать информацию порядка 300 Гбайт, что на порядок выше существующих оптических дисковых носителей информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Yaroslavsky L., Astola J.* Introduction to Digital Holography, p. 189, 2009.
2. *Hunter S., Kiamalev F., Esener S., Parthenopoulos D., Rentzepis P.* Potentials of two-photon based 3D optical memories for high performance computing, Appl. Opt. № 29, p. 2058–2066, 1990.
3. *Бетин А.Ю., Бобринев В.И., Злоказов Е.Ю., Одиноков С.Б. и др.* Метод компьютерного синтеза и проекционной записи микроголограмм для систем голографической памяти: математическое моделирование и экспериментальная реализация. Квантовая электроника, № 43 (1), с. 87–89, 2013.
4. *Одиноков С.Б., Вереникина Н.М., Подгородняя А.С., Донченко С.С.* Метод и оптическая система получения компьютерно-синтезированных микроголограмм голографического диска памяти. Вестник МГТУ, №610, с. 99–109, 2013.

Информационная ёмкость

Под информационной ёмкостью в данной работе будем понимать максимальное количество информации, которое может быть записано на единицу площади голограммы.

Оценим информационную ёмкость компьютерно-синтезированного голографического диска:

$$n = \frac{N}{h^2} = \frac{300 \cdot 4 \text{ Гбайт}}{\pi \cdot (130 \text{ мм})^2} \approx 23,2 \frac{\text{Мбайт}}{\text{мм}^2}, \quad (16)$$

где N – количество содержащейся на диске информации; h^2 – площадь голографического диска.

Для сравнения рассмотрим плотности записи оптических дисков, таких как DVD, Blu-Ray:

- HD – DVD 1,4 Мбайт/мм²;
- Blu – Ray 2,1 Мбайт/мм².

Плотность записи голографического диска фирмы Optware – 20 Мбайт/мм², т. е. плотность записи голографических дисков на порядок выше оптических.

Заключение

В работе рассмотрен и проанализирован метод компьютерного синтеза, который позволяет управлять свойствами фурье-голограммы и исключить сложную оптическую систему их получения.

Проанализировано влияние геометрических параметров пространственно-временного модулятора света на распределение поля в плоскости микроголограммы и показано, что если размерность ПВМС и микроголограммы отличаются не более чем в 1,2 раза, то возможно восстановление микроструктуры голограммы без искажения.

Метод проекции МГФ реализован в оптической системе фильтрации для уменьшения шумов от структуры ПВМС.

Проведённая оценка информационной ёмкости системы голографической памяти на базе компьютерно-синтезированных микроголограмм Фурье показала, что плотность записи голографического диска на порядок выше плотности записи существующих оптических дисков. ■



ОСОБЕННОСТИ ЦИФРОВОЙ СЪЁМКИ И ПРОЕКЦИИ

(Доклад на научно-технической конференции
«Операторское искусство России. Традиции и инновации»,
17–20 ноября 2013, ВГИК, г. Москва)



В. Сычёв, к.т.н., ОАО «НИКФИ»

■ Выход цифрового кинематографа к массовому зрителю можно отнести к 90-м годам прошлого века, когда, как грибы, начали появляться видеосалоны. Качество показа было неудовлетворительное, но там показывали фильмы, которые в государственный прокат выйти не могли. Это обуславливало повсеместную популярность видеосалонов.

К началу тысячелетия появились кинопроекторы лучшего качества, но стало ясно, что необходимо регулировать бесконтрольно развивающийся рынок оборудования и форматов. В 2000 году в SMPTE был сформирован и приступил к работе технический комитет DC28. К 2005 году в результате проделанной работы были подготовлены и опробованы стандарты SMPTE, регламентирующие основные стадии цифрового фильмопроизводства, связанные с взаимодействием участников технологического процесса. Какие-то разделы сознательно не стали формализовать, оставив свободу выбора производителям фильмов. Например, форматы съёмки и постпроизводства.

В 2005 году разработанные стандарты были приняты объединением ведущих кинокомпаний США и названы спецификацией DCI. Эта работа активно развивается, и постоянно выходят новые редакции. С 2008 года часть этих документов начала приниматься в качестве международных стандартов.

Были приняты или находятся в процессе принятия многие стандарты, относящиеся к демонстрации в кино-

театрах изображений при помощи цифровых проекторов. К цветовому кодированию и цветовому воспроизведению относится лишь малая их часть, которая является предметом рассмотрения.

Основные принципы обработки цвета в цифровом кинематографе

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

(1) Изображение, получаемое в одном зале, должно в пределах строгих допусков соответствовать изображению, получаемому в любом другом зале.

(2) Схема кодирования должна быть способна кодировать всю информацию, которую способен увидеть человек, и не вносить в изображение артефактов.

(3) Кодирование не должно быть привязано к какому-либо конкретному устройству или технологии (аппаратно-независимое кодирование).

(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). Для определения исходного изображения используется Исходный Цифровой Мастер (DSM), который

может быть источником многих различных цифровых изображений: изображений цифрового кино, изображений HDTV, изображений DVD и т.д. DSM делают в лаборатории постпроизводства, и лаборатория может создавать этот Исходный Мастер в том формате файла и цветовом пространстве, в котором она хочет.

(6) Кодирование должно охватывать цветовую гамму существующих цифровых проекторов, включать все возможные плёночные цвета и позволить реализовать будущие усовершенствования проекционной технологии.

Базис DCDM XYZ стал оптимальным решением среди всех 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, 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 можно показать, что эффективность не является критическим параметром), и что было недостаточно практического опыта работы с изображениями, закодированными в XYZ, в отличие от RGB.

Есть два закона колориметрии, на которых основано DCDM кодирование, и которые являются стартовой точкой для всех последующих вычислений:

(1) Для определения любого одного цвета требуется три и только три закодированных значения. Кроме этого, набор трёх закодированных значений определяет один и только один цвет. Если два света имеют одинаковые значения координат при одинаковых условиях рассматривания, эти два света будут совпадать для наблюдателя.

(2) Если свет со значениями координат XYZ_1 прибавляется к свету со значениями координат XYZ_2 , значения цветовых координат комбинации этих светов будут равны XYZ_1+XYZ_2 .

Важным следствием этих законов является то, что цвета, воспроизводимые любой аддитивной системой, лежат внутри треугольника, образованного базисными цветами этой системы. Кроме того, все цветности, лежащие вне этого треугольника, не могут быть воспроизведены этой системой.

Измерение проецируемых изображений

SMPTE 431-3 (и международный стандарт ISO 26431-1:2008) рекомендует только два типа измерений: яркости и цветности.

Яркость измеряется фотометром (яркомером) с кривой спектральной чувствительности стандартного наблюдателя (кривой видности ISO 10527:2007). Угол зрения фотометра не должен превышать 2 градусов. Измеритель должен иметь погрешность ± 0.5 кд/м² при измерении светлых полей и ± 0.07 кд/м² – при измерении тёмных.

Цветность должна измеряться спектрофотометром с минимальной погрешностью ± 0.002 для координат цветности x и y при яркости более 10 кд/м². Измерители цветовой температуры имеют недостаточную точность ни для измерения яркости, ни для измерения цветности.

Во всех случаях измеряется свет, отражённый от экрана. Т.е. измерительный инструмент должен быть направлен при измерении на экран.

Измерение белого

Яркость экрана при проекции через основу фильмокопии приведена в таблице 2.

Сравнение таблиц 1 и 2 показывает, что нормативные яркости цифровой и плёночной проекции практически совпадают.

При цифровой проекции добавляется важный *регулируемый* параметр – цветность белого. Нормативные значения цветности в центре экрана и допуски для просмотровых залов и кинотеатров приведены в таблице 3.

Табл. 1. Значения яркости белого при цифровой проекции

Параметр	Эталон	Допуски для просмотрового зала	Допуски для кинотеатра
Яркость в центре, 100% белый	48,0 кд/м ² (14,0 fL)	$\pm 3,5$ кд/м ² ($\pm 1,00$ fL)	$\pm 10,2$ кд/м ² ($\pm 3,00$ fL)
Яркость, края	85% от значения в центре	80%–90% от значения в центре	75%–90% от значения в центре
Яркость, углы	85% от значения в центре	80%–90% от значения в центре	Не определено

Табл. 2. Значения яркости белого при киноплёночной проекции для различных значений минимальной оптической плотности фильмокопии

D _{мин} (вуаль+основа) позитивной плёнки	0,00	0,05	0,06	0,07
L (яркость при проекции через D _{мин})	55,00	49,02	47,90	46,81

Табл. 3. Значения яркости белого при цифровой проекции

Параметр	Эталон	Допуски для просмотрового зала	Допуски для кинотеатра
Цветность белого, центр	$x=0,314$ $y=0,351$	$\pm 0,002 x$ $\pm 0,002 y$	$\pm 0,006 x$ $\pm 0,006 y$
Цветность белого, углы	$\pm 0,000 x$ $\pm 0,000 y$ от значения в центре	$\pm 0,008 x$ $\pm 0,008 y$ от значения в центре	$\pm 0,015 x$ $\pm 0,015 y$ от значения в центре

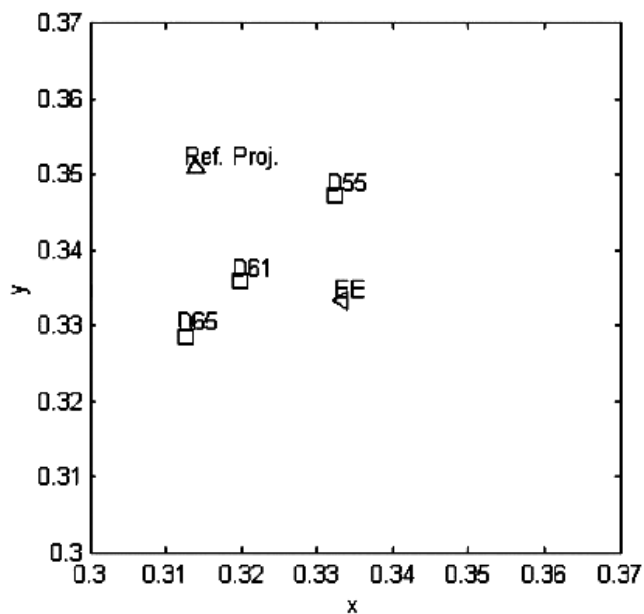


Рис. 1. Увеличенный фрагмент цветового пространства xu с обозначением различных белых точек

Координаты цветности белой точки эталонного проектора обозначены на рисунке 1 как *Ref.Proj.* На самом деле это настройка белой точки комбинации проектора и экрана, поскольку измеряется свет, отражённый от экрана.

Цветность белого при киноплёночной проекции *неуправляема*. Она определяется типом используемой лампы, цветностью экрана и проекционной оптики и редко контролируется при монтаже и настройке оборудования. Параметры цветности киноплёночной проекции:

- Стандартизованная цветовая температура белого 5800K \pm 400K.
- Цветовая температура ксеноновых ламп около 6100K.
- Цветовая температура дуговых ламп около 5400K.

Укажем для полноты картины, что цветность белого для телевизионной проекции (в том числе, HDTV и UHDTV) составляет 6500K (0.3127; 0.3290).

Измерение последовательного контраста

Последовательный контраст – это отношение яркости белого к яркости «чёрного» в зале. «Чёрный» цвет в зале определяется как свет, отражённый от экрана, когда зал

находится в нормальном рабочем режиме (при включённом дежурном освещении), проектор включён, и на него подан сигнал с очень низкими кодированными значениями. Требования к последовательному контрасту и соответствующим допускам приведены в таблице 4.

Табл. 4. Значения и допуски для последовательного контраста

Параметр	Эталон	Допуски для просмотрового зала	Допуски для кинотеатра
Последовательный контраст	2000:1 минимум	1500:1 минимум	1200:1 минимум

Значения последовательного и внутрикадрового контраста показывают возможность воспроизведения градаций в тенях изображения. Казалось бы, вклад «несюжетных» источников, определяющих последовательный контраст (табл. 4), на порядок меньше засветки, обусловленной переотражением из зала «сюжетного» изображения и характеризуемой внутрикадровым контрастом (табл. 5). Однако внутрикадровый контраст является мерой *относительной* засветки, и при малой интегральной яркости изображения (затемнённые, ночные сцены) вклад этой засветки оказывается также достаточно малым. При этом постоянный уровень «чёрного» зала может стать решающим фактором в воспроизведении теней изображения.

Производители проекционной техники указывают в рекламных проспектах на свою продукцию значения контраста (по сути – последовательного контраста), равные 5000:1, 10000:1 и более, нереальные для условий рабочего режима кинотеатрального показа. Если даже предположить, что в каком-то кинозале реализованы подобные значения контраста, то это весьма сомнительное достижение. Для фильмов, производство и приёмка которых проводилась в зале со стандартным контрастом 1500:1, в зале с большим контрастом в глубоких тенях проявятся детали, не предусмотренные создателями этих фильмов, и не факт, что авторам это понравится.

Есть ещё два аспекта контроля последовательного контраста. Во-первых, эталонное значение яркости чёрного поля в соответствии с таблицами 1 и 4 равно $48/2000=0,024$ кд/м², что существенно меньше погрешности измерения современных кинотеатральных фото-

метров. Поэтому нужен измеритель другого класса и стоимости.

Во-вторых, уровень чёрного – величина нерегулируемая при установленном проекторе и необходимом дежурном и аварийном освещении.

Поэтому маловероятно, что приведённые здесь рекомендации SMPTE 431-3 по измерению последовательного контраста когда-либо найдут воплощение в национальных или международных стандартах цифрового кинематографа (так же, как их нет в стандартах плёночного кинопоказа). Тем не менее, важно их учитывать при проектировании кинозалов (особенно просмотровых), а также при работе с тёмными планами в процессе постпроизводства.

Измерение внутрикадрового (шахматного) контраста

Внутрикадровый контраст является мерой засветки экрана излучением, отражённым от экрана в зал и из зала обратно на экран. Он измеряется с помощью шахматной таблицы 4x4 с переменными белыми и чёрными полями. Внутрикадровый контраст рассчитывается как сумма яркостей белых полей, делённая на сумму яркостей чёрных полей. Требования к внутрикадровому контрасту и соответствующим допускам приведены в таблице 5.

Табл. 5. Значения и допуски для внутрикадрового контраста

Параметр	Эталон	Допуски для просмотрового зала	Допуски для кинотеатра
Внутрикадровый контраст	150:1 минимум	100:1 минимум	100:1 минимум

Аналогичным параметром для плёночной проекции является уровень относительной засветки (ϵ), составляющей:

- 0,4% яркости, создаваемой проектором, для просмотрового зала;
- 1% яркости, создаваемой проектором, для кинозала.

Как сопоставить параметры относительной засветки и внутрикадрового контраста? Для измерения засветки используется непрозрачная кашетка, монтируемая в кадровое окно кинопроектора и перекрывающая небольшой кружок в центре экрана. Отношение яркости чёрного поля, перекрытого кашеткой, к яркости белого определяет уровень засветки. Т.е. яркость чёрного в данном случае формируется светом, отражённым от *всего* экрана в зал и обратно на экран.

Яркость чёрных полей шахматного теста формируется переотражённым светом половины экрана, поэтому должна быть в 2 раза ниже, чем в предыдущем случае. Т.е.:

$$K_{BK} \approx 2 / \epsilon$$

Более строгий расчёт даёт поправку к приведённой формуле не более 1–2%.

Например, при нормативном внутрикадровом контрасте (100:1) маленький чёрный кружок при проекции белого на весь экран имел бы контраст 50:1 или 2%.

Таким образом, нормативы засветки при цифровом кинопоказе мягче в 2 раза для кинотеатров и в 4 раза для просмотровых залов. Практика показывает, что это гораздо более реальное требование, хотя и оно выполняется крайне редко.

Специфика цифрового кинопоказа

Принципиальными отличиями цифрового кинопоказа от плёночного являются:

- Пространственная дискретизация;
- Дискретизация уровня сигнала;
- Цифровая обработка сигнала (цветовое кодирование, сжатие, переформатирование);
- Аддитивный цветовой синтез и, как следствие, независимое управление тремя цветоделёнными компонентами сигнала.

Контроль нескольких следующих параметров определяется этими отличиями и является специфическим требованием цифрового кинопоказа. Более того, практически все приводимые ниже рассуждения в равной мере относятся к процессам цифровой съёмки и постпроизводства.

Структурные характеристики воспроизведения цифровых изображений

Под структурными характеристиками понимают обычно возможность и качество воспроизведения мелких деталей и резких градационных переходов (точка, линия, край). Отметим, что если в процессе съёмки, постпроизводства, передачи или хранения цифровых фильмов были использованы ненормативные алгоритмы сжатия (например, MPEG) с высокими коэффициентами компрессии, то может быть нарушено воспроизведение отнюдь не мелких деталей.

Структурные характеристики цифровых изображений определяются тремя отдельными факторами: оптической схемой, пространственной дискретизацией и математической обработкой.

1. Характеристики структурного воспроизведения плёночных изображений (функция передачи модуляции, частотно-контрастная характеристика, разрешающая способность) не могут быть непосредственно применены к описанию преобразований с дискретными компонентами [12]. Цифровое оборудование содержит аналоговые (оптические) компоненты, которые могли бы быть описаны этими характеристиками. Однако наличие дискретных компонентов в оптической схеме любого цифрового устройства серьёзно усложняет задачу.

2. Разрешение, обусловленное пространственной дискретизацией, описывается форматом выборки (количество, размер, форма пикселей). Этот формат определяет не только минимальный размер элемента изображения, но и артефакты дискретизации: муар, краевые эффекты

(ступеньки, дрожание). На их заметность существенное влияние оказывает также оптическая функция передачи модуляции и математическая обработка на пространственных частотах, близких к частоте дискретизации.

3. Операции кодирования, компрессии, изменения формата приводят к возникновению артефактов, зависящих от алгоритма преобразования. Ведутся активные исследования влияния этих артефактов на визуальное восприятие и разработка методов их оценки. Принятые в настоящее время стандарты цифрового кинематографа задают преобразования, которые не приводят к сколь угодно заметному ухудшению качества изображения. Однако контроль соблюдения этих стандартов на всех этапах фильмопроизводства невозможен. Контролируется только конечное изображение. Поэтому так важно разработать критерии качества цифрового контента и методы их определения.

Таким образом, для описания структурных характеристик цифрового оборудования (пункты 1 и 2) и цифрового контента (пункт 3) пока не разработано адекватных общепризнанных критериев и методов контроля.

Визуальная оценка появления ложных контуров

Ложные контуры являются следствием дискретизации уровня сигнала и выражаются в появлении ступеней или зон там, где должен быть постоянный или гладкий градиент. Контуры являются функцией многих переменных, и важно иметь серию тестов с малыми градациями, чтобы воспроизвести различные ситуации, возникающие в изображениях. В качестве примеров можно привести небесный горизонт, особенно на восходе и закате солнца, лицо крупным планом, естественное снижение яркости вокруг интенсивных источников света, особенно при атмосферном рассеянии или линзовой фильтрации. Тестовые клинья должны иметь глубину шага не менее четырёх пикселей с единичным приращением кодированного значения на шаг, и должны располагаться на фоне, равном минимальному значению клина, так чтобы глаз был адаптирован на максимальную чувствительность.

Оценка этого артефакта производится визуально. Нужно рассматривать каждое изображение или последовательность изображений с нормального расстояния и при нормальных рабочих условиях и установить, есть ли заметные контуры (пороги яркости) или цветовые отклонения от серого.

При создании контента широко используется динамическое затемнение до чёрного. Документы SMPTE 431 не предлагают каких-либо особых тестов для динами-

ческого затемнения; однако клина, начинающегося так, как описано выше, с медленно уменьшающимися затем кодированными значениями, было бы вполне достаточно. Практически, наблюдатель смотрит динамическое затемнение и регистрирует появление не нейтральных цветов в серии гаснущих изображений.

Визуальная проверка воспроизведения серой шкалы

Наличие трёх цветовых каналов в цифровом проекте определяет необходимость контроля их градационной согласованности, которая может быть оценена по воспроизведению серой шкалы во всём диапазоне яркостей. Визуальная оценка является лучшим тестом нейтральности шкалы, чем любые измерения, хотя и не даёт количественной характеристики.

Измерение показателя степени функции передачи

Важнейшим элементом системы цифрового кинематографа является цветовое кодирование, обеспечивающее сжатие цветоделённых сигналов без потери качества до 12 бит на цвет для передачи и хранения. Уравнения кодирования и декодирования:

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

Аналогичные уравнения определяют преобразование для Y и Z.

Показатель степени функции передачи управляет контрастом проецируемого изображения, который является важной частью общего качества изображения. Допуски на показатель степени функции передачи разработаны таким образом, чтобы позволить некоторые отклонения в системе, не приводящие к серьёзному ухудшению качества изображения.

Измерение цветовой гаммы (базисных цветов)

При аддитивном синтезе цветовая гамма определяется координатами цветности и значениями яркости трёх базисных цветов, белого и чёрного. Уровни белого и чёрного в зале были описаны выше. Минимальный комплект базисных цветов приведён в таблице 7. Рекомендуются производить измерение координат цветности и значения яркости в центре экрана при полнокадровой проекции кодированных значений цветового базиса.

Координаты базисных цветов и белого определяют матричное преобразование между XYZ DCDM и необходимыми количествами RGB проектора. Указанные в табл. 7

Табл. 6. Оптимальные значения показателя степени функции преобразования и допуски для просмотровых залов и кинотеатров

Параметры изображения	Номинальное значение (эталонный проектор)	Допуски (просмотровый зал)	Допуски (кинотеатр)
Показатель степени	2,6	±2% От 2,548 до 2,652	±5% От 2,47 до 2,73

Табл. 7. Кодированные значения, яркость и координаты цветности базиса RGB

Базисный цвет	Кодированные значения			Координаты цветности		Яркость
	X'	Y'	Z'	x	y	Y, кд/м ²
Красный	2901	2171	0	0,6800	0,3200	10,06
Зелёный	2417	3493	1222	0,2650	0,6900	34,64
Голубой	2014	1416	3816	0,1500	0,0600	3,31

значения определяют минимальный цветовой охват проектора для цифрового кинематографа. Проектор может иметь и большую цветовую гамму при использовании другого базиса. Если мастеринг проводился на оборудовании с расширенной гаммой, файл DCDM может содержать цвета, выходящие за пределы минимальной гаммы. При воспроизведении на проекторе с меньшей гаммой часть цветов может быть обрезана с использованием более или менее сложных алгоритмов.

С одной стороны, цветовая гамма цифрового кинематографа достаточно велика, чтобы обрезание цветов, выходящих за её пределы (очень насыщенных и редких), не приводило к сколько-нибудь существенному ухудшению качества цветопередачи. С другой стороны, авторы фильма должны учитывать возможные ограничения воспроизведения цветов стандартными кинотеатральными проекторами.

Разработчики стандарта UHD TV пошли ещё дальше (рис. 2). Такой выбор стимулирует производство и продажу новых моделей оборудования. Но в кинематографе, в отличие от телевидения, стандарты призваны определить минимальный уровень качества демонстрации фильмов в кинотеатре, а не задать планку, к которой следует стремиться.

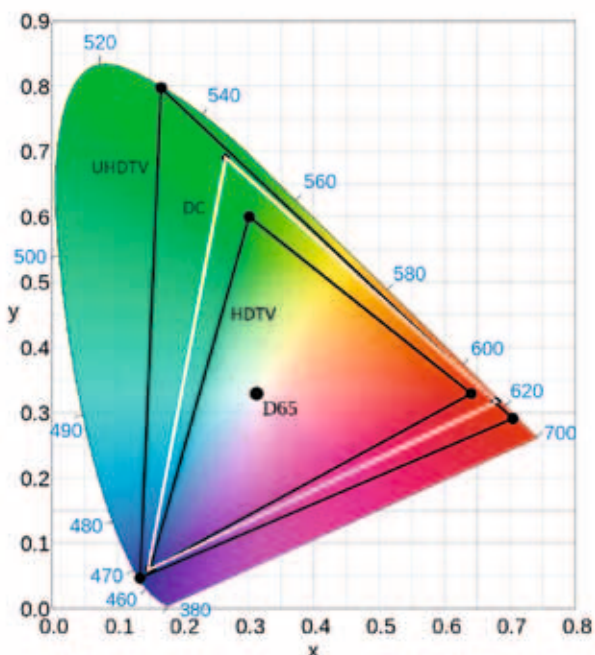


Рис. 2. Цветовая гамма цифрового кинематографа (DC) в сравнении с телевидением высокой (HDTV) и сверхвысокой (UHD TV) чёткости

Задание точности цветового воспроизведения

В пределах минимальной цветовой гаммы, заданной для эталонного проектора, все цвета должны воспроизводиться с точностью $4 \Delta E^*ab$. Теоретически это

требование относится ко всем цветам; однако на практике нереально вывести на экран и измерить все возможные цвета, которые могут быть закодированы равенствами цветового кодирования DCDM и воспроизведены эталонным проектором. Поэтому для проверки точности цветопроизведения системы используют выборки характерных цветов. Предполагается, что если эти цвета находятся в допустимых пределах, то и все остальные цвета, скорее всего, окажутся также в допустимых пределах.

Заключение

Очевидно, что переход к цифровой съёмке, обработке и проекции неизбежен. Цифровое оборудование, обладая большими функциональными возможностями, оказывается и намного сложнее в управлении и обслуживании. Поэтому для цифровых кинотехнологических процессов особенно важно:

- Разработать и принять пакет нормативных документов (национальные стандарты, инженерно-технические руководства, справочники).
- Иметь средства и методы контроля.
- Восстановить систему обязательной сертификации кинопоказа. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. SMPTE 432-1, «Color Processing for D-Cinema».
2. SMPTE 428-1, «Digital Cinema Distribution Master (DCDM) – Image Characteristics».
3. SMPTE 431-1, «D-Cinema Exhibition Screen Luminance Level, Chromaticity, and Uniformity».
4. SMPTE 431-2, «Reference Projector and Environment for Display of DCDM in Review Rooms and Theaters».
5. SMPTE 431-3, «Projection Image Measurements».
6. Digital Cinema Initiatives, LLC (DCI). Digital Cinema System Specification. Version 1.1. April 12, 2007.
7. ISO 2910:2007. Cinematography – Screen luminance and chrominance for the projection of motion pictures.
8. ISO 26428-1:2008. D-Cinema Distribution Master – Image Characteristics.
9. ISO 26431-1:2008. Digital cinema (D-cinema) quality – Part 1: Screen luminance level, chromaticity and uniformity.
10. ISO/DIS 26431-2. Digital cinema (D-cinema) quality – Part 2: Reference projector and environment.
11. *Maier T.* Color Processing Processing for Digital Cinema 4: Measurements and Tolerances. SMPTE Mot. Imag. J, 116:510–517, Nov/Dec 2007 (Перевод в МТК №9, с. 42–48, 2008).
12. *Сычёв В.А.* Особенности контроля разрешающей способности при цифровой проекции. МТК № 14, с. 50–52, 2009.



САМЫЕ ПЕРВЫЕ В ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ МИРОВОГО КИНЕМАТОГРАФА



Н.А. Майоров, режиссёр-оператор, киновед,
член Союза кинематографистов России

(Продолжение. Начало в МТК № 27, 28, 29)

1901

– Первая в мире ночная съёмка с использованием искусственного света в фильме «Panorama of Esplanade by Night» проведена Эдвином С. Портером (Edwin S. Porter).

– Первый поворот кинокамеры на 360 градусов проведён Эдвином С. Портером в фильме «Круговая панорама с электрической вышки».

– Пионер оптической звукозаписи немецкий физик Эрнст Румер (Ernst Ruhmer), который в 1900 году начал проводить опыты по созданию фонограмм на плёнке, в 1901 году запатентовал «Photographophone» (Фотографофон) – аппарат фотографической записи звука.

1902

– Первый в мире опыт монтажа репортажного материала с игровым провёл режиссёр Эдвин С. Портер в фильме «The Life Of An American Fireman» (Жизнь американского пожарного).

– 1 сентября Жорж Мельес выпустил на экран первый в мире научно-фантастический фильм «Le Voyage dans la Lune» (Путешествие на Луну). Фильм был выпущен в чёрно-белом варианте и в «цветном» (часть копий была раскрашена покaдрово вручную). Эти уникальные цветные копии дошли до наших дней и хранятся в двадцати киноархивах по всему миру. На 64-м Каннском кинофестивале в мае 2011 года состоялась премьера реставрированного цифровым способом цветного полного варианта фильма.

1903

– Братья Люмьер сняли стереоскопический вариант «L'Arrivee du Train» (Прибытие поезда) двумя 35-мм кинокамерами для демонстрации по анаглифическому способу. К сожалению, до сих пор не удаётся установить, где и когда был показан этот фильм, и был ли такой фильм вообще. Хотя информация об этом событии часто встречается в различных периодических изданиях и книгах прошлого века по истории кино.

– 1 декабря в США выходит на экран «The Great Train Robbery» (Большое ограбление поезда), в котором ре-



Кадр из раскрашенного вручную позитива «Le Voyage dans la Lune» (Путешествие на Луну) (1902)

жиссёром Эдвином С. Портером впервые в мире был применён параллельный монтаж.

1905

– 3 июля в Великобритании выходит на экран фильм «Rescued by Rover» (Спасённая Ровером). Фильм вошёл в историю кино как самый дешёвый фильм. На его производство было затрачено всего 37,4 долларов США. Прокатный успех картины был огромный. Для компенсации износа первых 400 копий создателям пришлось в 1905–1906 гг. снять два его ремейка. Главный герой фильма английский колли стал первым в мире животным-кинозвездой.



Кадр из фильма «Rescued by Rover» (Спасённая Ровером) (1905)

1906

– 7 апреля выпущен на экран первый в мире рисованный мультфильм «Humorous Phases of Funny Faces» (Смешные лица).

– 26 сентября в Австралии выпущен на экран первый в мире полнометражный фильм (1225 метров, бюджет 450 фунтов) – «The Story of the Kelly Gang» (История банды Келли).

1907

– 20 июня во Франции выпущен на экран первый полнометражный фильм в Европе продолжительностью 90 минут «L' Enfant prodige» (Вундеркинд).

1909

– 26 февраля в Лондоне в «Palace Theatre of Varieties» состоялась первая в мире демонстрация цветного фильма «A Visit to the Seaside» (Посещение побережья), снятого по системе двухцветного «Kinematocolor» (Кинемаколор) режиссёром Джорджем Альбертом Смитом (George Albert Smith).

1910

– Выходит на экран первый в мире цветной игровой фильм «The Story of Napoleon» (История Наполеона) по системе двухцветного «Kinematocolor».

– 20 мая проведены первые цветные документальные съёмки «Funeral of King Edward VII» (Похороны Короля Эдуарда VII) по системе двухцветного «Kinematocolor».

1911

– 4 сентября в Швеции создана первая в мире государственная киноцензура.

– 5 декабря в Дании по инициативе копенгагенского журналиста из газеты «Politiken» Анкера Киркеби (Anker Kirkeby) был создан первый в мире киноархив.

1912

– 2 февраля английской компанией «Natural Colour Kinematograph Co.» выпущен на экран первый в мире документальный полнометражный (126 мин.) цветной фильм в двухцветном «Kinematocolor» – «The Delhi Durbar» (Торжества в Дели).

– 20 мая в США выпущен первый полнометражный игровой фильм «Oliver Twist» (Оливер Твист), 1500 м (5частей).



Кадр из фильма «The Delhi Durbar» (Торжества в Дели) (1911)

– 26 июля в США выпущен на экран первый в мире киносериял из 12 серий «What Happened to Mary?» (Что случилось с Мэри?).

1913

– Выходит на экран «Secret of an air» (Тайна воздуха) – первая в мире совместная международная постановка (Австралия-Франция).

– 26 декабря в России выпущен на экран первый в мире кукольный мультипликационный фильм с участием живых актёров «Ночь перед рождеством» режиссёра Владислава Старевича.

1914

– Режиссёр Дэвид Уорк Гриффит (D.W. Griffith) в фильме «The Squaw Love» (Любовь индианки) впервые в мире использовал несколько кинокамер (три камеры) для съёмок одной сцены.

– 15 февраля выходит **первый в мире ремейк «The Squaw man»** (Муж индианки). Сесиль Блаунт де Милль (Cecil B. DeMille) был первым режиссёром, который сделал ремейк собственного фильма – в 1913, 1918 и 1931 годах.

– 14 ноября выходит **первая в мире полнометражная кинокомедия** и первый полнометражный фильм с участием **Чарли Чаплина** «Tillie's Punctured Romance» (Прерванный роман Тилли) режиссёра Мак Сеннета.



Кадр из фильма «Tillie's Punctured Romance» (Прерванный роман Тилли) (1914)

1915

– 10 июня в США в «Астор-Театре» (Astor Theater) в Нью-Йорке состоялся **первый в США коммерческий показ стереоскопических фильмов** Э.С. Портера (E. S. Porter) и В. Вадделла (W. Waddella) по анаглифическому методу (красные и зелёные очки). В программе были показаны:

- «The rural scenes» (Сельские сцены);
- «Jim the Penman» (Джим «Ручка»). Игровой фильм с участием актёров Джона Мэсона (John Mason) и Мари Доро (Marie Doro);
- «Niagara waterfall» (Ниагарский водопад).



Кадр из фильма «20000 лье под водой» (1916)

1916

– 24 декабря выходит на экран «20000 Leagues Under the Sea» (20000 лье под водой) режиссёра Эжена Гаудио (Eugene Gaudio) – **первый в мире фильм**, в котором демонстрируются **подводные съёмки**. Братья Джордж Вильямсон (George M. Williamson) (12.06.1885–23.05.1956) и Джон Эрнест Вильямсон (John Ernest Williamson) (08.12.1881–15.07.1966) разработали специальное съёмочное оборудование для подводных съёмок и провели первые в мире подводные съёмки для этого фильма на Багамских островах. Этот фильм стал первой полнометражной экранизацией двух романов Жюль Верна: «20000 лье под водой» и «Таинственный остров».

1918

– 25 февраля выпущен на экран **первый цветной фильм в двухцветном Technicolor (процесс № 1)** «The Gulf Between» (Над пропастью).



Кадр из фильма «The Gulf Between» (Над пропастью) (1917)

1920

– 8 февраля компания Брэй Пикча Корпорейшен (Bray Picture Corporation's) выпускает **первый в мире цветной мультфильм «The Debut of Thomas Cat»** (Дебют кота Томаса) в двухцветном процессе «Brewster Color».

1922

– Французская фирма «Pathé» (Патэ) начала **производство 9,5-мм чёрно-белой плёнки с размером кадра 8,5х6,6 мм**.

– 17 сентября в Берлине состоялся просмотр **звукового фильма**. Звук был записан на ленте в виде световых сигналов и шёл синхронно с изображением.

– 27 сентября в Лос-Анджелесе, в «Ambassador Hotel Theater» показан **первый в мире игровой стереоскопический фильм «Power of**



9,5-мм киноплёнка Pathe

Love» (Энергия любви), снятый по **двухплёночной системе Fairhall-Elder 3D**. Демонстрация производилась по анаглифическому методу с красно-зелёными очками. Система была разработана Гарри К. Файрхаллом (Harry K. Fairhall) и Робертом Ф. Елдером (Robert F. Elder).

– 26 ноября в США выпущен на экран **первый цветной фильм по двухцветной субтрактивной системе Technicolor** (процесс № 2) **«Toll of the Sea»** (Потери моря).



Кадр из фильма **«Toll of the Sea»** (Потери моря) (1922)

1923

– Американская фирма **«Eastman Kodak Company»** начала производство **16-мм чёрно-белой плёнки**.

– 15 апреля в Нью-Йорке, в **«Rivoli Theater»** состоялась первая общественная демонстрация звукового фильма по системе **«Phono-film»**, разработанной Ли Де Форестом (Lee De Forest). Фильм не сохранился.

1924

– В июне выпущен на экран **первый в мире звуковой мультфильм «Mother, Mother, Mother Pin a Rose on Me»** Макса (Max) и Дэва (Dave) Флэйшнеров (Fleischer) со звуком, записанным по системе Ли Дэ Фореста **«Phonofilm sound process»**.

1925

– Началась **эра электромеханической записи звука с использованием микрофона**. Значительно улучшилось качество записываемого звука, уменьшились его искажения, расширился частотный диапазон с 150–4000 Гц до 50–10000 Гц.

– Международный конгресс в Париже принял **стандарт формы и размеров перфорации на негативной и позитивной плёнках**, расположение кинокадра на 35-мм плёнке, предложенное фирмой **«Pathe»**.

1926

– 2 мая 1926 года в Берлине состоялась демонстрация первого в мире полнометражного немого мультипликационного фильма **«Die Abenteuer des Prinzen Achmed»**

(Приключения принца Ахмеда). Выпущен на экран 3 сентября 1926 года в Германии.

– 6 августа в США демонстрировался **«Don Juan»** (Дон Жуан) – первый немой фильм, выпущенный звуковым, с синхронными музыкой и шумовыми эффектами по системе **«Vitaphone»** (Витафон).



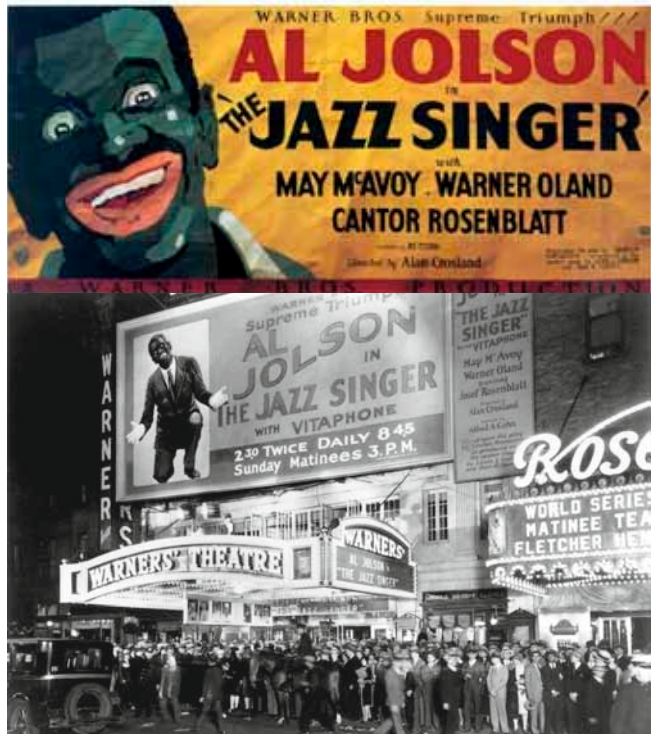
Зрители у кинотеатра **«Warner's Theatre»** в вечер премьеры фильма **«Don Juan»** (Дон Жуан)

1927

– 11 января глава **«Metro-Goldwyn-Mayer»** Луис Майер (Luis Mayer) объявляет о создании **Academy of Motion Picture Arts and Sciences – A.M.P.A.S.** (Американская академия кинематографических искусств и наук). Первым президентом Академии, которая была официально учреждена в мае этого же года, стал Дуглас Фэрбенкс (Douglas Fairbanks).

– 21 января в Нью-Йорке, в **«Sam Harris Theater»** состоялась премьера **первого в мире выпуска звукового киножурнала «Fox Movietone News»** (Фокс Мувитон Ньюс).

– 6 октября вышел на экран **первый в мире звуковой фильм с синхронным диалогом актёров «The Jazz Singer»** (Певец джаза).



Перед премьерой **«The Jazz Singer»** (Певец джаза)

1928

– Американская кинокомпания «Фох» применяет для съёмки киноплёнку «Grandeur» (Грандёр) с размером кадра **46,8x23,2 мм** и с соотношением сторон изображения 2:1.

– 7 июля выпущен на экран в США **первый в мире 100% звуковой фильм «Lights of New York»** (Огни Нью-Йорка).

– 19 сентября выпущен на экран **первый американский звуковой мультфильм «Steaboat Willie»** (Пароходик Вилли).



Кадр позитивной копии фильма с оптической фонограммой переменной плотности на 70-мм киноплёнке по системе Grandeur из фильма «The Big Trail» (Большая тропа) (1930)

1929

– Первый 100% говорящий мультипликационный фильм – **«Bosko The Talk-Ink Kid»** выпущен на экран летом 1929 года кинокомпанией «Warner Brothers».

– Кинокомпания «Metro-Goldwyn-Mayer» предлагает киноплёнку **«Realife»** (Рилайф) шириной 65 мм.

– Кинокомпания «Paramount» использует для съёмки киноплёнку шириной 56 мм и размером кадра 41x18,7 мм, с соотношением сторон 2.2:1 и пытается ввести в производство фильмов киноплёнку шириной 65 мм под названием **«Magnafilm»** с размером кадра 46x23 мм при шаге 23,75 мм.

– Американская фирма «Radio Corporation» предлагает киноплёнку шириной 63,5 мм с размером кадра 52,5x28,4 мм при шаге 28,5 мм.

– Фирма «Warner Bros.» применяет киноплёнку **«Vitascope»** (Витаскоп) шириной 65 мм с размером кадра 50,8x28 мм и с соотношением сторон изображения 1.8:1.

– 1 февраля киностудией «Metro-Goldwyn-Mayer» выпущен на экран **первый в мире мюзикл, получивший «Оскар»** – **«The Broadway Melody»** (Мелодии Бродвея).

– 17 апреля вышел на экраны **первый в мире дублированный фильм «Show Boat»** (Плавучий театр). Дубляж одного актёра другим изобрёл режиссёр Эдвин Гопкинс. Применил его впервые режиссёр Гарри Поллард.

– 16 мая в Голливуд Рузвельт Отеле (Hollywood Roosevelt Hotel) прошла **первая церемония вручения премий** за 1927–1928 годы Academy of Motion Picture Arts and Sciences (Американской академии кинематографических искусств и наук), получившей в 1939 году официальное название **«Oscar»** (Оскар). В 1927 году Ака-

демия насчитывала 36 членов, ныне в ней ~ 6000 человек и 14 отделений.

Первую статуэтку «Оскара» создали: главный художник MGM Седрик Гиббонс (Cedrick Gibbons) и лос-анджелесский скульптор Джордж Стенли (George Stanley). Статуэтка изображает рыцаря, опирающегося на меч и стоящего на бобине с киноплёнкой. Пять делений бобины означают 5 изначальных отделений Академии – актёры, режиссёры, продюсеры, техники и сценаристы. Каждая статуэтка



Статуэтка «Oscar»

изготавливается из сплава олова и меди с добавками сурьмы. Покрывается тремя слоями: медь, нейзильбер (сплав меди, цинка и никеля) и 24-каратное золото. Вес статуэтки 3,8 кг, высота – 34,3 см. Статуэтки изготавливаются Чикагской фирмой «R. S. Owens and Company». Премия присуждается ежегодно в двадцати номинациях, кроме того, вручается ряд специальных и почётных премий.



На первой церемонии вручения премии «Оскар» 16 мая 1929 года

– 26 мая состоялся **первый показ первого в мире полнометражного кинофильма на 70-мм плёнке «Fox Movietone Follies of 1929»** (Кинобезумства Фокса 1929 года).

– 27 мая вышел **первый в мире дублированный на иностранный язык фильм «Broadway»** (Бродвей) режиссёра Пала Фейюша (Pál Fejös).

– 9 августа в США выпущен на экран **первый в мире звуковой киносериял из 10 серий – «King of the Kongo»** (Король Конго).

– 2 ноября выпущен на экран **первый в мире цветной звуковой** (музыка и звуковые эффекты) фильм по двухцветной субтрактивной системе **«Technicolor»** (процесс № 3, гидротипная печать) **«The Viking»** (Викинг).



Постер к фильму «The Viking» (Викинг) (1929)

1930

– Выпущен на экран **первый в мире полнометражный кукольный фильм «Le Roman de Renard»** (Рейнеке Лис) режиссёра В. Старевича.



Кадры из мультфильма В. Старевича «Le Roman de Renard» (Рейнеке Лис) (1930)

– Американская фирма «Bell & Howell» разрабатывает комплект широких киноплёнок для кинематографа:
 «Экономик» – 46 мм с кадром 30,76x18,29 мм при шаге 19 мм, с соотношением сторон 1.68:1;
 «Спектракуляр» – 52 мм с кадром 38x21,8 мм при шаге 23,75 мм, с соотношением сторон 1.74:1;
 «Экстрем» – 61,31 мм с кадром 46,31x27,79 мм при шаге 28,5 мм, с соотношением сторон 1.3:1.



Анаморфотная насадка Hypergonar

– 20 мая в Париже состоялась премьера **первого в мире широкоэкранного фильма «Construire un feu»** (Возникновение огня), снятого по системе «Hypergonar» (Гипергонар). С 5 декабря 1930 года фильм демонстрировался в Париже 3 месяца.

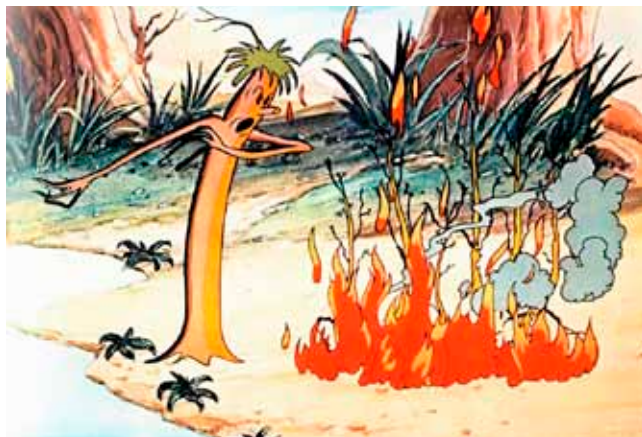
1932

– Принят **стандарт размера кадра в звуковом кинематографе**, определена частота кадров при съёмке и проекции – **24 кадра в секунду**.

– Американская фирма «Eastman Kodak Company» начала **выпуск 8-мм чёрно-белой плёнки**.

– В августе в Венеции прошёл **первый в мире международный кинофестиваль**.

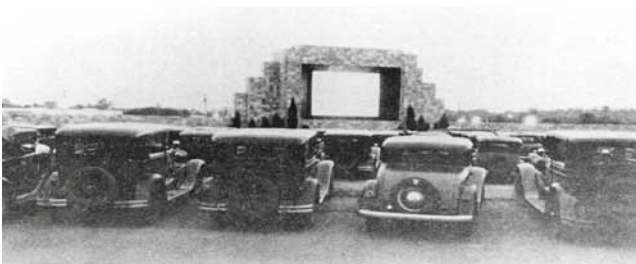
– 30 сентября выпущен на экран **первый в мире полноцветный мультфильм «Flowers and Trees»** (Цветы и деревья), снятый по трёхцветной субтрактивной системе «**Technicolor**» (процесс № 4, гидротипная печать).



Кадр из фильма «Flowers and Trees» (Цветы и деревья) (1932)

1933

– 6 июня Ричард Холлингсхед (Richard Hollingshead) во дворе собственного дома в городе Камден, штат Нью-Джерси, официально открывает **первый в мире автомобильный кинотеатр** на 400 машин.



Первый автомобильный кинотеатр (1933)

1934

– 31 августа выпущен на экран **первый в мире цветной игровой фильм «Cucaracha»** (Кукарача), снятый по трёхцветной субтрактивной системе «**Technicolor**» (процесс № 4, гидротипная печать).



Кадр из фильма «Cucaracha» (Кукарача) (1934)

1935

– Американская фирма «Eastman Kodak Company» (Истмен Кодак Компани) начала выпуск 16-мм цветной любительской киноплёнки «KODACHROME».



Любительская киноплёнка «KODACHROME»

– 13 июня выпущен на экран **первый в мире цветной полнометражный игровой фильм «Becky Sharp»** (Бекки Шарп), снятый по трёхцветной субтрактивной системе **Technicolor** (процесс №4, гидротипная печать).



Кадр из фильма «Новый Гулливер» (1935)

1936

– Американская фирма «Eastman Kodak Company» выпускает **первый 16-мм звуковой кинопроектор**, а также **цветную 35-мм плёнку для слайдов и 8-мм киноплёнку «KODACHROME»**.



Цветная 35-мм плёнка для слайдов и 8-мм киноплёнка «KODACHROME»

– Немецкая фирма «Agfa» начала выпуск **многослойной цветной фотоплёнки**.

– **Первый в мире звуковой полнометражный стереоскопический фильм «Nozze vagabonde»** (Свадьба нищего) выпущен в Италии.

– Фирма «Zeiss Ikon» (Цейсс-Икон) оборудует берлинский кинотеатр «УФА-Палас» (UFA Palast), вмещавший 2000 зрителей, специальной аппаратурой и серебряным экраном, и начинает регулярную демонстрацию **стереоскопических фильмов по поляроидному методу**, разработанному Арденне (Ardenne).



Немецкая многослойная цветная фотоплёнка

1937

– В Парижском «Дворце Света» на Международной выставке был показан **звуковой широкоэкранный фильм с анаморфированным изображением на двух 35-мм киноплёнках**. Фильм демонстрировался с двух синхронно связанных кинопроекторов, фонограмма воспроизводилась с отдельной плёнки.

– 5 ноября студией Диснея (Disney) выпущен на экран **первый мультиплановый мультфильм «The Old Mill»** (Старая мельница).

– 15 декабря в Германии выходит на экран **первый в мире цветной экспериментальный короткометражный фильм по негативно-позитивному процессу «Agfacolor» – «Die Postkutsche»** (Почтовая карета).

– 21 декабря выпущен на экран **первый в мире цветной полнометражный мультипликационный фильм «Snow White And The Seven Dwarfs»** (Белоснежка и семь гномов), снятый по системе трёхцветный «Technicolor» (Техниколор).

1938

– Немецкая фирма «Agfa» начала выпуск **16-мм любительской цветной плёнки**.

1939

– На Международной выставке в Нью-Йорке фирма «Крейслер» демонстрирует рекламный стереоскопический фильм «**Motor Rhythm»** (Моторный ритм) по поляроидному методу.

1940

– 20 марта выпущен на экран первый мультфильм из серии «**Tom and Jerry»** (Том и Джерри) «**Puss Gets The Boot»**.

– В апреле киностудия «Warner Bros.» выпустила на экран **первый звуковой стереофонический фильм «Santa Fe Trail»**.

– 13 ноября выпущен на экран **первый в мире цветной звуковой стереофонический мультипликационный фильм «Fantasia»** (Фантазия).

– 25 декабря выпущен на экран цветной фильм Александра Корда (Alexander Korda) «**The Thief of Bagdad»** (Багдадский вор), в котором впервые был применён синий экран для съёмки по методу «**блуждающей маски»** Лоренса Батлера (Lawrence Butler) и Томми Ховарды (Tommy Howard). ■

Продолжение следует