

Мир Кино

ТЕХНИКИ

ИЮЛЬ-СЕНТЯБРЬ | 3(33)-2014 |

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

**РАСЧЁТ ВРЕМЕНИ
РЕВЕРБЕРАЦИИ**
В ЗАЛАХ

**АНАМОРФОТНЫЕ
ОБЪЕКТИВЫ**
ДЛЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ
КИНЕМАТОГРАФИИ

**УФ-ОТВЕРЖДАЕМЫЙ
ПОЛИМЕРНЫЙ
МАТЕРИАЛ**
ДЛЯ СОЗДАНИЯ РЕПЛИК
ДИФРАКЦИОННЫХ
ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

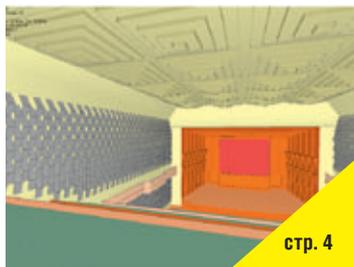
**СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ
УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ**
СИГНАЛОВ
ЗВУКОВОЙ ЧАСТОТЫ

В КАДРЕ –

ПЕРВАЯ МИРОВАЯ



№ 33 СОДЕРЖАНИЕ



стр. 4

Новости и обзоры

Н.А. Майоров
Будем снимать кино... 2



стр. 14

Вопросы теории

Ю.А. Индлин
Расчёт времени реверберации в залах 4

Технологии

Л.С. Тихонова
Системотехническое моделирование усилителя мощности сигналов звуковой частоты 9



стр. 19

С.Б. Бирючинский
Анаморфотные объективы для профессиональной кинематографии 14

В.Г. Чафонова, И.В. Газеева, Г.В. Тихомирова
Автоматизация контроля и коррекции разномасштабности изображений стереопары 19



стр. 37

О.Э. Бабкин, А.В. Жданова, В.В. Ильина, В.Н. Михайлов
УФ-отверждаемый полимерный материал для создания реплик дифракционных оптических элементов 32

Страницы истории кино

Н.А. Майоров
В кадре – Первая мировая (продолжение. Начало в МТК № 32) 37

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»
Материалы подготовлены и размещены при финансовой поддержке Министерства культуры Российской Федерации.
Выпуск издания осуществлён при финансовой поддержке Федерального агентства по печати и массовым коммуникациям.

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

Редакционный совет:
Овечки 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., ВГИК
Винокур А.И., д.т.н., МГУП им. И. Фёдорова
Перегудов А.Ф., к.т.н., СПбГУКИТ
Блохин А.С., к.т.н., ОАО «НИКФИ»
Барский И.Д., к.т.н., ВГИК
Одиноков С.Б., д.т.н., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Раев О.Н., к.т.н., ВГИК
Волков А.С., к.т.н., Министерство культуры РФ

Отпечатано в ООО «ИПП «КУНА»
Объём 5 п.л. Заказ № 129886.
Тираж 1000 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



БУДЕМ СНИМАТЬ КИНО...

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

22 марта 1973 года. Москва. Идёт снег, холодно, почти 13 градусов мороза.

В Симферополе облачно, без осадков, 7 градусов тепла.

Ялта. По набережной, скинув кожанку, шагает Леонид Иович Гайдай (фото 1). По волнорезу в лёгких летних костюмах неспешно идут Михаил Иванович Пуговкин и две Натальи – Кустинская и Селезнёва (фото 2). В Ялте светит солнце и 14 градусов тепла. Только что закончилась съёмка «южного» эпизода для комедии «Иван Васильевич меняет профессию». Через несколько месяцев этот фильм выйдет на экраны Советского Союза, и никому из зрителей даже в голову не придёт, что песню «Звенит январская вьюга» в лёгком красном платье Наталья Игоревна Селезнёва поёт под лучами мартовского солнца, а не знойного лета. Очередной кинообман?! Нет – производственная необходимость в реализации творческого замысла...

Море, горы, глубокие каньоны и сказочные пещеры, великолепные дворцы и парки, современные автобаны и разбитые дороги времён римской империи, тропическая природа и растительность средней полосы, развитая инфраструктура – и всё это под лучами ласкового, сияющего около 2250 часов в году крымского солнца. Всё это идеальные условия для исполнения самых смелых, фантастических идей кинематографистов круглый год. Это – отечественный «Голливуд», Крым, Ялта. Не уступающая по своим световым условиям Каннам и Ницце, находящаяся на одной географической широте с итальянскими Генуей и Равенной, Ялта по количеству сухих и солнечных дней впереди Сочи. Длительное и жаркое

лето, бесконечное «бабье лето» до глубокой осени, иногда переходящее на зимние месяцы – идеальные условия для отдыхающих и круглогодичные трудовые будни для кинематографистов. Когда в горах ещё лежит январский снег, на Южном берегу Крыма уже бушует многоцветье южных первоцветов. Когда пляжи Южного берега заполняются «тюленьими» телами отдыхающих, центральный Крым – прекрасная площадка для съёмки и выжженной солнцем степи, и плодоносных садов и полей.

Официальная советская история кино Крыма обычно начинается с упоминания первых видовых съёмок французской кинофирмой «Пате» в Ялте в 1908 году, опуская информацию о киносъёмках пребывания царской семьи в Ливадии в том же году. Это хроникальные съёмки 1908 года, хранящиеся в Российском государственном архиве кинофотодокументов:

- «Посещение Николаем II Крымского полка в Ливадии»;
 - «Пребывание царской семьи в Ливадии»;
 - «Николай II с семьёй в Ливадии»;
 - В 1909 году была проведена киносъёмка «Прибытие Николая II в Ялту»;
 - В 1910 году в Ливадии была проведена первая киносъёмка «дипломатических» мероприятий «Турецкие и персидские послы на приёме у Николая II в Ливадии».
- К 1910 году относятся также киносъёмки:
- «Праздник личного конвоя Николая II в Ливадии»;
 - «Пребывание эмира Бухарского в Ливадии у Николая II».

Эти и другие съёмки положили начало кинодокументалистики Крыма и сохранили для нас не только собы-



Рис. 1. Л.И. Гайдай на набережной Ялты 23 марта 1973 года



Рис. 2. Наталья Кустинская (слева) и Наталья Селезнёва на набережной Ялты 23 марта 1973 года



Рис. 3. Памятник А. Ханжонкову в Ялте

тийные материалы, но и уникальные виды знаменитых памятников архитектуры и курортов начала XX века.

Уникальные природные и климатические условия неизбежно бы привлекли в Крым не только курортников, но и работников художественной кинематографии.

Александр Алексеевич Ханжонков (фото 3), российский предприниматель, организатор кинопромышленности, продюсер, режиссёр, сценарист, один из пионеров русского кинематографа, может по праву считаться отцом русского профессионального кинопроизводства в Крыму. Именно он весной 1917 года организует полноценное кинопроизводство в Ялте и до своего отъезда в ноябре 1920 года в Константинополь снимает фильмы на созданной им киностудии на Севастопольской улице.

Именно здесь, в Крыму, на Ялтинской киностудии Акционерного общества «Ханжонков и Ко» в 1911 году был снят первый российский полнометражный игровой исторический фильм «**Оборона Севастополя**». В начале 1911 года в прессе появилось сообщение: «С высочайшего соизволения Его Императорского Величества государя императора, фабрикант русских кинематографических картин, состоящий в запасе по войску Донскому, есаул Ханжонков, приступает к съёмке грандиозной батальной картины «Осада Севастополя». Одновременно сообщалось, что съёмки будут производиться на подлинных местах боёв. Первый показ фильма состоялся 26 октября 1911 года в царском дворце в Ливадии в присутствии Николая II и членов царской семьи. А 28 октября 1911 года в большом зале Московской консерватории прошла его общественная премьера. В наши дни фильм демонстрируется в кинопавильоне Музея героической обороны и освобождения Севастополя.

Один из первых русских кинопредпринимателей Иосиф Николаевич Ермольев в 1918 году также открыл филиал своей московской кинокомпании в Ялте, где до 1920 года работали выдающиеся мастера отечественного кино Наталья Лисенко, Иван Мозжухин, Яков Протазанов, Александр Волков, Зоя Карабанова, Николай Римский, Александр Лошаков, Эдуард Гош, Николай Рудаков, Федот Бургасов и др.

22 мая 1919 по декрету, подписанному Ялтинским военно-революционным комитетом, киностудия Ханжонкова и Ермольева были национализированы.

Полноценная работа киностудии была восстановлена только в 1922 году, и 13 февраля 1923 года на экраны был выпущен первый художественный фильм студии «**Призрак бродит по Европе**» режиссёра Владимира Ростиславовича Гардина по мотивам рассказа Эдгара По «**Маска Красной Смерти**».

С 20 года прошлого века до первого десятилетия века двадцать первого киностудия многократно переходила из рук в руки и сменила «чёртову дюжину» названий.

Но для большинства советских зрителей административная принадлежность и юридическое название киностудии мало что значили. Главным были фильмы, которые снимались на студии или с использованием её возможностей.

Не будет ошибкой утверждение, что практически все великие советские режиссёры пользовались услугами студии или снимали целиком свои картины на её технической базе. И в Крыму был снят не один десяток советских фильмов, ставших классикой не только отечественного, но и мирового кино. Фильмов, любимых всеми нашими зрителями.

Вот далеко не полный список отечественных фильмов, снятых в Крыму:

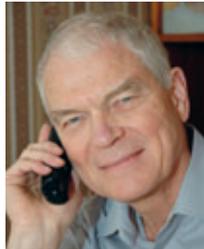
«Адмирал Ушаков», «Адъютант его превосходительства», «Алые паруса», «Асса», «Бег», «Бегущая по волнам», «Белое солнце пустыни», «Вождь краснокожих», «Всадник без головы», «Гамлет», «Дама с собачкой», «Двенадцатая ночь», «Деловые люди», «Дети капитана Гранта» (1936), «Доктор Айболит», «Дон Кихот», «Десять негрятя», «Из жизни отдыхающих», «Илья Муромец», «Кавказская пленница», «Коктебель», «Король Лир», «Освобождение», «Крылья», «На Дерибасовской хорошая погода, на Брайтон-Бич опять идут дожди», «Новый Гулливер», «Оборона Севастополя», «Обыкновенное чудо», «Овод», «Остров сокровищ» (1937, 1971, 1982 гг.), «Офицеры», «Пираты XX века», «Праздник святого Йоргена», «Приключения Буратино», «Процесс о трёх миллионах», «Пятнадцатилетний капитан», «Робинзон Крузо» (1947), «Сказка о царе Салтане», «Собака на сене», «Сократ», «Солярис», «Спортлото-82», «Таинственный остров» (1941), «Три плюс два», «Трудно быть богом» (1989), «Туманность Андромеды», «Узник замка Иф», «Человек-Амфибия» (1962, 2003), «Щит и меч», «Ялта-45».

Сегодня совершенно не важно, будет ли у студии новое название или сохранится старое. Важно, чтобы скорее раздалась команда «мотор», и начались съёмки новых, и главное – очень хороших фильмов.

Для этого есть всё: бассейн, натурные площадки, кинопавильоны. И тогда на 12,88 гектарах земли на Поликуровском холме и 1,4 га на улице Севастопольской никому не придёт в голову строить элитные хоромы вместо декораций, и начнётся новый отсчёт истории старейшей киностудии России. ■



РАСЧЁТ ВРЕМЕНИ РЕВЕРБЕРАЦИИ В ЗАЛАХ



Ю.А. Индлин, к.т.н., ОАО «НИКФИ»

Аннотация

Расчёты при проектировании и акустические измерения в построенном Государственном концертном зале новосибирской филармонии подтвердили гипотезу Беранека о том, что при расчёте времени реверберации звукопоглощение кресельной зоны определяется площадью, которую она занимает, практически независимо от количества кресел, а точному учёту подлежат лишь звукопоглощение кресельной зоны и поверхностей, занятых звукопоглощающим материалом; остальные поверхности получают коэффициент поглощения 0,08–0,09, определённый экспериментально и связанный с наличием разнообразных технологических элементов (вентрешётки, светильники и др.). Гипотеза Беранека и полученные им коэффициенты поглощения кресельной зоны применимы при использовании для расчётов по эмпирической формуле Сэбина, которая является частным случаем более общей формулы Эйринга. Экспериментальные данные, приведённые Беранеком, позволили пересчитать эти коэффициенты поглощения для использования в формуле Эйринга. Оказалось, что обе формулы дают хороший результат, только когда используются соответствующие им коэффициенты поглощения.

Ключевые слова: время реверберации, коэффициент звукопоглощения, концертный зал, акустические измерения.

■ Часть 1

В отечественных руководствах [1] при расчёте времени реверберации звукопоглощение кресел (пустых или занятых публикой) принято учитывать произведением $A_a \times N$, где A_a – (эквивалентное) звукопоглощение кресла, N – количество кресел.

Между тем, ещё полвека назад Беранек [2] установил, что при обычной плотности мест (0,45–0,79 м² пола на человека) звукопоглощение кресельной зоны изменяется

CALCULATION OF REVERBERATION TIME IN HALLS

Y. Indlin

Abstract

The calculations in the design and acoustic measurements in the built Concert Hall of the Novosibirsk Philharmonic confirmed the L.Beranek's hypothesis that in the calculation of the reverberation time the sound absorption of the chair area is determined by the area it occupies, almost regardless of the number of seats, and in exact account needs only a sound absorption of the chair area and the surface covered with sound-absorbing material; other surfaces obtained absorption coefficient 0,08–0,09, experimentally determined and related to the presence of a variety of technological elements (ventilation openings, lamps and other typical installation). Beranek's hypothesis and received absorption coefficients of the chair area applicable when used for calculations by the empirical W.Sabin's formula, which is a special case of the more general C.Eyring's formula. The experimental data presented by Beranek allowed to count these absorption coefficients for use in the Eyring's formula. It turned out that both formulas give good results when using only the corresponding absorption coefficients.

Keywords: reverberation time, sound absorption coefficients, concert hall, acoustic measurements.

пропорционально площади, которую она занимает, практически независимо от количества кресел. Кроме того, он учитывал объёмный характер кресельной зоны. Согласно Беранеку, точный учёт звукопоглощения кресел даёт произведение $\alpha_a S_A = \alpha_a (S_a + S_s)$, где α_a – коэффициент звукопоглощения кресельной зоны, S_a – площадь акустических кресельных зон, которая складывается из площади S_a , занимаемой креслами, плюс площадь S_s полосы шириной 0,5 м в проходах вокруг блоков кресел, вводимой для учё-

та поглощения боковых поверхностей блоков (если блок кресел боковой поверхностью примыкает к стене, то для этой поверхности полоса не добавляется).

На базе этой гипотезы, формулы Сэбина и экспериментов в залах Беранеком [3] были получены коэффициенты звукопоглощения кресел (пустых и занятых), которые широко используются акустиками.

Кроме того, в нескольких готовых концертных залах удалось провести измерения до установки кресел. Средний коэффициент звукопоглощения оказался выше ожидаемого за счёт наличия технологических отверстий, вентиляционных решёток, осветительных приборов и других трудно учитываемых элементов. На этом основании было введено понятие реального звукопоглощения остаточных поверхностей зала, которое определялось произведением коэффициента реального поглощения α_r (измеренного в этих экспериментах) на остаточную площадь S_r поверхностей зала за минусом площади, занятой креслами и звукопоглощающими материалами.

Другими словами, для получения достоверного результата расчёта всем поверхностям зала, исключая площади, занятые креслами и звукопоглощающими материалами, должен приписываться коэффициент звукопоглощения α_r .

Таким образом, формула Сэбина для времени реверберации T_c получила следующий вид:

$$T_c = 0,161V / (\alpha_{cp}S + 4mV) = 0,161V / (\alpha_a S_a + \alpha_b S_b + \alpha_r S_r + 4mV), \quad (1)$$

- где V – объём зала, измеренный в отсутствие кресел,
- $\alpha_a S_a$ – коэффициент и площадь акустических кресельных зон,
- $\alpha_b S_b$ – коэффициент и площадь звукопоглощающего материала,
- $\alpha_r S_r$ – коэффициент реального звукопоглощения и остаточная площадь,
- m – константа, связанная с поглощением звука в воздухе.

По этой формуле был проведён расчёт для частоты 1 кГц и влажности 60% в Государственном концертном зале новосибирской филармонии (ГКЗ) без публики:

Объём зала $V = 12580 \text{ м}^3$.

Общая площадь поверхностей зала $S = 4470 \text{ м}^2$.

Кресельная зона: $\alpha_a = 0,72$, $S_a = 573 \text{ м}^2$.

Полоса вокруг кресельных зон: $\alpha_s = 0,72$, $S_s = 88 \text{ м}^2$.

QRD диффузоры: $\alpha_b = 0,23$, $S_b = 260 \text{ м}^2$.

Остаточная площадь: $\alpha_r = 0,08$, $S_r = 4470 - 573 - 88 - 260 = 3549 \text{ м}^2$.

Поглощение в воздухе при влажности 60%: $4m = 0,0016$.

Объём зала и площади поверхностей определялись из компьютерной модели (рис.1), построенной в программе EASE.

Расчёт среднего коэффициента звукопоглощения:

$$\alpha_{cp} = (\alpha_a S_a + \alpha_b S_b + \alpha_r S_r) / S = (476 + 60 + 284) / 4470 = 0,1834$$

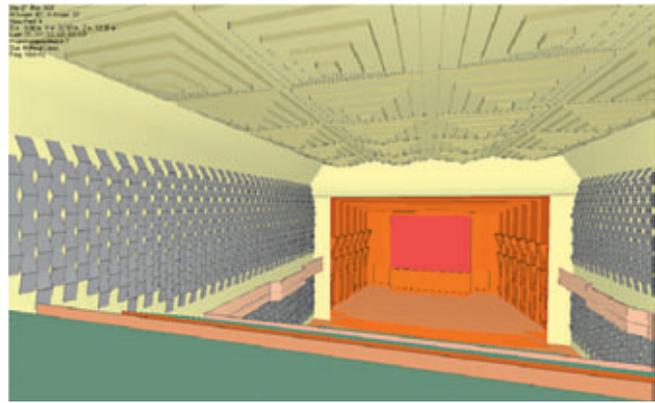


Рис. 1. Вид с балкона в компьютерной модели

Расчёт по формуле (1) даёт

$$T_c = 0,161V / (\alpha_{cp} S + 4mV) = 2,41 \text{ с.}$$

Компьютерный зал построен в точном соответствии с проектом (рис. 2 и рис. 3).

Результат этого расчёта близок к результату измерений в построенном зале ($T_{изм} = 2,39 \text{ с}$, перечисленное на влажность 60% $T_{изм} = 2,40 \text{ с}$) [4].

Расчёт по формуле Эйринга дал в тех же условиях $T_s = 2,18 \text{ с}$, заметно сниженное относительно результатов измерений. Это говорит о том, что коэффициенты звукопоглощения, полученные Беранеком с помощью формулы Сэбина, нужно с осторожностью применять при расчёте по формуле Эйринга.

Вывод. Согласно гипотезе Беранека, время реверберации в залах определяется формулой Сэбина, в которой учитывается звукопоглощение:

- кресельной зоны с соответствующим коэффициентом поглощения;
- полосы шириной 0,5 м в проходах вокруг блоков кресельных зон с тем же коэффициентом поглощения;
- звукопоглотителя, если он есть;
- остаточной площади поверхностей зала с коэффициентом реального поглощения.

Результаты расчёта времени реверберации по этой гипотезе для Государственного концертного зала новосибирской филармонии и результаты измерений в построенном зале практически совпали при использовании коэффициентов звукопоглощения, вычисленных Беранеком с помощью формулы Сэбина из результатов измерений в нескольких концертных залах.

Часть 2

В нашей стране принята методика расчёта времени реверберации [1], разработанная НИИСФ, которая отличается от гипотезы Беранека по следующим пунктам:

- звукопоглощение A_a кресельной зоны рассчитывается как произведение числа кресел на звукопоглощение кресла;
- полоса вокруг кресельных блоков не вводится;



Рис. 2. Вид в построенном зале с балкона



Рис. 3. Вид в построенном зале от эстрады

– вместо реального звукопоглощения вводится дополнительное звукопоглощение, которое относится ко всей площади поверхностей (в дополнение к поглощению этих поверхностей);

– расчёт производится по формуле Эйринга.

Рассмотрим эти отличия более подробно применительно к данным ГКЗ.

В руководствах приводятся данные по звукопоглощению кресла α_a , сведённые в табл. 1.

В ГКЗ ширина кресла 0,55 м, расстояние между рядами 0,9 м (ситуация близкая к стандартной), следовательно, площадь, занимаемая одним местом, равна произведению этих величин, т. е. примерно 0,5 м². Это позволяет перейти к коэффициенту звукопоглощения кресельной зоны α_a в табл. 2, удвоив величины в табл. 1.

Измерения, проведённые в залах, позволили Беранеку предложить коэффициенты, представленные в табл. 3.

Коэффициенты Беранека существенно выше. Это завышает оценку времени реверберации по методике НИИСФ.

Отказ от учёта объёмности кресельных блоков (т. е. отсутствие полос вокруг кресельных блоков) также завышает оценку времени реверберации по методике НИИСФ.

Дополнительный коэффициент звукопоглощения α_r в методике НИИСФ обычно составляет 0,04 на средних и высоких частотах; он относится ко всей площади поверхностей зала. Если привести этот коэффициент к площади S_r , не занятой креслами и звукопоглотителями в ГКЗ, то получим $\alpha_r = 0,049$. В методике НИИСФ эта площадь учитывается со своим коэффициентом звукопоглощения (0,03 в нашем случае), поэтому можно сказать, что площади S_r приписывается реальный коэффициент $\alpha_r = 0,079$.

Экспериментальные данные [3] приведены в табл. 4.

Для ГКЗ применима группа В. Коэффициенты Беранека и модифицированные коэффициенты НИИСФ практически совпадают.

Проведение расчётов по формуле Эйринга занижает оценку времени реверберации по методике НИИСФ.

Итак, два отличия завышают оценку времени реверберации в методике НИИСФ, одно – нейтрально и одно – занижает. Проверим их взаимное действие на примере ГКЗ на частоте 1 кГц.

Объём зала $V = 12580$ м³.

Общая площадь поверхностей $S = 4382$ м².

Кресельная зона: $\alpha_a = 0,5$ (табл. 2, кресло мягкое), $S_a = 573$ м².

QRD диффузоры: $\alpha_b = 0,23$, $S_b = 260$ м².

Остаточная площадь: $\alpha_r = 0,079$, $S_r = 4382 - 573 - 260 = 3549$ м².

Поглощение в воздухе при влажности 60%: $4m = 0,0016$.

Расчёт среднего коэффициента звукопоглощения:

$$\alpha_{cp} = (\alpha_a S_a + \alpha_b S_b + \alpha_r S_r) / S = (286 + 60 + 285) / 4382 = 0,144$$

В результате, расчёт по Эйрингу даёт

$$T_3 = 0,161V / (-S \ln(1 - \alpha_{cp}) + 4mV) = 2,89 \text{ с.}$$

Табл. 1. Эквивалентная площадь звукопоглощения кресла A_a (НИИСФ)

№	Наименование	Звукопоглощение A_a , м ² на частоте, Гц					
		125	250	500	1000	2000	4000
1	Кресло мягкое	0,15	0,2	0,2	0,25	0,3	0,3
2	Кресло полужёсткое	0,08	0,1	0,15	0,15	0,2	0,2

Табл. 2. Коэффициент звукопоглощения кресельной зоны α_a (НИИСФ)

№	Наименование	Коэффициент звукопоглощения кресельной зоны α_a на частоте, Гц					
		125	250	500	1000	2000	4000
1	Кресло мягкое	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6
2	Кресло полужёсткое	0,16	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4

Табл. 3. Коэффициент звукопоглощения кресельной зоны α_a (Беранек)

№	Наименование	Коэффициент звукопоглощения кресельной зоны α_a на частоте, Гц					
		125	250	500	1000	2000	4000
1	Кресло мягкое (heavily upholstered)	0,72	0,76	0,83	0,84	0,83	0,79
2	Кресло полумягкое (medium upholstered)	0,56	0,64	0,70	0,72	0,68	0,62
3	Кресло полужёсткое (lightly upholstered)	0,35	0,45	0,57	0,61	0,59	0,55

Табл. 4. Реальный коэффициент звукопоглощения α_r (Беранек, Хидака)

№	Наименование	Реальный коэффициент звукопоглощения α_r на частоте, Гц					
		125	250	500	1000	2000	4000
1	Группа А: облицовка толщиной менее 2,5 см	0,16	0,13	0,10	0,09	0,08	0,08
2	Группа В: облицовка толщиной более 2,5 см	0,12	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08

Табл. 5. Эквивалентная площадь звукопоглощения занятых кресел A_a (НИИСФ)

№	Наименование	Звукопоглощение A_a , м ² на частоте, Гц					
		125	250	500	1000	2000	4000
1	Зритель в кресле мягком и полумягком	0,25	0,3	0,4	0,45	0,45	0,4

Табл. 6. Коэффициент звукопоглощения занятой кресельной зоны α_a (НИИСФ)

№	Наименование	Коэффициент звукопоглощения кресельной зоны α_a на частоте, Гц					
		125	250	500	1000	2000	4000
1	Зритель в кресле мягком и полумягком	0,5	0,6	0,8	0,9	0,9	0,8

Расхождение результатов расчёта по методике НИИСФ (2,89 с) с результатами измерений (2,4 с) – значительно; если выбрать полужёсткое кресло (табл. 2), расхождение результатов будет ещё большим.

Наиболее очевидная причина этого – заниженное звукопоглощение кресел, которое не замечалось, возможно, потому, что расчёт обычно вёлся для заполненного на 70% зала, а для занятых кресел рекомендованное НИИСФ звукопоглощение оказалось близким к экспериментальным данным. Действительно, данные НИИСФ, приведённые в табл. 5, трансформируются в коэффициенты звукопоглощения в табл. 6, которые можно сравнить с экспериментальными данными Беранека (табл. 7).

Нетрудно заметить, что данные таблиц 6 и 7 достаточно близки.

Другая причина завышенной оценки времени реверберации – отказ от учёта объёмного характера кресельных зон в виде добавляемых полос.

А между тем, по данным Беранека, относительный вес площади добавляемых полос S_s/S_a в исследованных залах лежит в пределах 0,11–0,41, и таким образом, существенно влияет на результат.

Вывод. Применение методики НИИСФ к расчёту времени реверберации в ГКЗ показало, что выбор неподобного звукопоглощения кресел и отказ от учёта объёмного характера кресельных блоков приводит к завышенной оценке времени реверберации.

Часть 3

В первой части статьи было показано, что гипотеза Беранека на базе формулы Сэбина, применённая к ГКЗ, дала результат расчёта, хорошо согласующийся с измерениями в зале.

В отличие от формулы Эйринга, которая при тех же допущениях дала более низкое значение времени реверберации, а при использовании в методике НИИСФ (вторая часть) дала более высокое значение времени реверберации.

Отсюда, конечно, не следует, что формула Сэбина точнее формулы Эйринга. В действительности, формула Эйринга выведена теоретически, а формула Сэбина, первоначально эмпирическая, является теоретически частным случаем формулы Эйринга при небольшом среднем коэффициенте звукопоглощения.

Хороший результат гипотезы Беранека объясняется тем, что исходные

данные были получены экспериментально с использованием формулы Сэбина.

И Беранек в своих работах [5] настаивает, что полученные на базе акустических измерений коэффициенты звукопоглощения должны использоваться исключительно в рамках формулы Сэбина (All of the absorption coefficients ... are for use in Sabine equation)

Вместе с тем понятно, что формула Сэбина не слишком удобна, поскольку она не работает при больших коэффициентах звукопоглощения. Поэтому представляется разумным пересчитать экспериментальные данные Беранека с помощью формулы Эйринга с тем, чтобы использовать их в дальнейшем при расчётах по этой формуле.

Реальный коэффициент $\alpha_r = 0,08$ не нуждается в пересчёте, поскольку достаточно мал. По-другому с звукопоглощением кресел.

Расчёты звукопоглощения полумягких кресел (medium upholstered) проводились Беранеком по результатам из-

Табл. 7. Коэффициент звукопоглощения занятой кресельной зоны α_a (Беранек)

№	Наименование	Коэффициент звукопоглощения кресельной зоны α_a на частоте, Гц					
		125	250	500	1000	2000	4000
1	Зритель в кресле мягком	0,76	0,83	0,88	0,91	0,91	0,89
2	Зритель в кресле полумягком	0,68	0,75	0,82	0,85	0,86	0,86
3	Зритель в кресле полужёстком	0,56	0,68	0,83	0,86	0,86	0,55

Табл. 8. Параметры залов, использованные Беранеком для оценки звукопоглощения кресел

Наименование	V, м ³	S, м ²	S _A , м ²	Частота 1 кГц			
				T _{изм} , с	α_r	α_a	$\alpha_{аз}$
Buffalo, Kleinhans Music Hall	18240	6150	1960	1,70	0,08	0,71	0,586
Stuttgart, Liederhalle, Bethovensaal	16000	5410	1300	2,17	0,08	0,66	0,551
New York, Avery Fisher Hall	20400	7930	1480	2,20	0,08	0,66	0,553
Bristol, Colston Hall	13450	4250	987	2,10	0,08	0,78	0,646
Liverpool, Filharmonic Hall	13570	5590	1275	1,60	0,08	0,80	0,666
Среднее						0,72	0,60

мерений в пяти концертных залах, параметры которых приведены в табл. 8 (в облицовке залов не было звукопоглощающих материалов, поэтому $S = S_A + S_r$).

Нетрудно проверить выполнение формулы Сэбина:

$$T_{изм} = 0,161 V / (S\alpha_{ср} + 4mV),$$

где
$$\alpha_{ср} = (\alpha_a S_A + \alpha_r S_r) / S$$

$$4m = 0,0016$$

Пересчёт осуществлялся с помощью формулы Эйринга:

где
$$T_{изм} = 0,161 V / (-S \ln(1 - \alpha_{ср,з}) + 4mV),$$

$$\alpha_{ср,з} = (\alpha_{аз} S_A + \alpha_r S_r) / S$$

Результат пересчёта дан в последнем столбце табл. 8. Напомним, что проведённый в первой части расчёт по формуле Сэбина времени реверберации для частоты 1 кГц в ГКЗ дал $T_c = 2,411$ с ($\alpha_a = 0,72$).

Расчёт по формуле Эйринга времени реверберации для частоты 1 кГц в ГКЗ с учётом пересчитанного коэффициента звукопоглощения кресел (последний столбец табл. 8) даёт $T_3 = 2,439$ с ($\alpha_{аз} = 0,60$).

ЛИТЕРАТУРА

1. Климухин А.А., Киселева Е.Г. Проектирование акустики зрительных залов, МАРХИ, 2012.
2. Beranek LL. Audience and seat absorption in large halls. J Acoust Soc Am 1960; 32:661.
3. Beranek LL, Hidaka T. Sound absorption in concert halls by seats, occupied and unoccupied, and by the hall's interior surfaces. J Acoust Soc Am 1998; 104:3169.
4. Индлин Ю.А. Государственный концертный зал новосибирской филармонии. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: indlin2013/narod/ru, свободный.
5. Beranek L.L. Concert halls and opera houses. Springer, 2004.

Несовпадение оценок говорит о том, что усреднённый пересчитанный коэффициент не вполне подходит ГКЗ, поскольку среднее отношение S_3/S_a в залах (табл. 8) отличается от этого отношения в ГКЗ.

Для ГКЗ больше подходит коэффициент $\alpha_{аз} = 0,61$. Пересчёт с этим коэффициентом даёт $T_3 = 2,418$ с.

Обе оценки весьма близки к результатам измерений в зале ($T_{изм} = 2,4$ с).

Возвращаясь к методике НИИСФ (вторая часть) и воспользовавшись пересчитанным для формулы Эйринга коэффициентом $\alpha_{аз} = 0,61$, получим $T_3 = 2,61$ с, что всё ещё довольно далеко от результатов измерения в зале. Причина теперь – в игнорировании объёмного характера кресельных блоков, заложенного в добавляемые полосы шириной 0,5 м. При учёте в соответствии с гипотезой Беранека площади этих полос, мы получим уже известный результат: $T_3 = 2,418$ с.

Вывод. Для проверки гипотезы Беранека при использовании более общей формулы Эйринга потребовалось пересчитать с помощью формулы Эйринга результаты измерений, представленные Беранеком.

Результаты расчёта времени реверберации по гипотезе Беранека с использованием пересчитанных коэффициентов и формулы Эйринга в ГКЗ весьма близки к результатам измерений, что подтверждает гипотезу в более общем виде.

Заключение

Опубликованные Беранеком коэффициенты звукопоглощения получены экспериментально с использованием формулы Сэбина и применимы для расчётов времени реверберации исключительно по формуле Сэбина.

Для расчётов по более общей формуле Эйринга были пересчитаны коэффициенты звукопоглощения кресел с использованием формулы Эйринга.

Обе формулы (Сэбина и Эйринга) дали хороший результат, когда использовались соответствующие им коэффициенты звукопоглощения. ■



СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ СИГНАЛОВ ЗВУКОВОЙ ЧАСТОТЫ



Л.С. Тихонова, к.т.н., СПбГУКиТ

Аннотация

Предложено системотехническое решение устройства, моделирующего такие функциональные особенности работы усилителей мощности сигналов звуковой частоты, как ограничение полосы пропускания цепи прямой передачи, раздельное усиление положительной и отрицательной полуволн сигнала двухтактным выходным каскадом, возникновение нелинейных искажений, обусловленных перегрузкой по входу и ограничением амплитуды выходного сигнала напряжением источника питания.

Ключевые слова: моделирование, усилитель, сигналы звуковой частоты.

■ Проблема проведения системотехнического моделирования устройств обработки сигналов на функциональном уровне требует своего разрешения при выполнении научно-исследовательских, научно-технических, конструкторских и технологических работ. Грамотно проведенное моделирование и последующая оптимизация параметров на этапе функционального проектирования позволяют сэкономить значительные силы и средства на этапах схемотехнического проектирования и конструирования устройства.

В настоящее время тенденции к автоматизации всего процесса проектирования радиоэлектронных устройств

SYSTEMS ENGINEERING MODELING OF THE AUDIO SIGNAL POWER AMPLIFIER

L. Tikhonova

Abstract

The paper is devoted to the systems engineering model of the device that shows such functional features of audio signals power amplifiers as forward path bandwidth limitation of high frequencies, separate half-wave push-pull amplification, appearance of nonlinear distortion by limiting the amplitude of the output signal with the power supply voltage.

Keywords: modeling, amplifier, audio signals.

привели к появлению разряда САПР, решающих задачи функционального моделирования, моделирования работы отдельных схем и т. д. К тому же эти САПР обладают средствами анализа процессов, происходящих в модели. Трансформация макетирования и натурного моделирования в математическое моделирование с возможностью представления объекта его экспериментальными характеристиками привело к появлению специализированных САПР виртуальных инструментов. Они обладают средствами для создания виртуальных устройств различного назначения: осциллографов, анализаторов спектра, а также средствами обработки данных, полу-

ченных как в режиме реального времени от физического объекта, так и в виде файлов данных. Виртуальный инструмент можно использовать при анализе модели, созданной САПР функционального проектирования. Комбинирование САПР функционального моделирования и САПР виртуальных инструментов позволяет не только создать модель, но и детально исследовать её поведение. К числу таких САПР, например, относятся системы SystemView, MatLab, LabView и др.

В результате информационных исследований, проведённых для организации НИР и учебного процесса кафедры радиотехники и информационных технологий (до недавнего времени – кафедры технической электроники) СПбГУКиТ, была выбрана система поведенческого моделирования электронных узлов и блоков SystemView (SV), разработанная компанией Elanix [1]. В настоящее время пакет переименован в «SystemVue». Для применения пакета SV необходимо знание основ теории обработки сигналов, основных сведений по математике и владение навыками работы в среде Windows.

Программный пакет SV представляет собой «конструктор», позволяющий из стандартных «кубиков» (примитивов) создавать функциональные схемы устройств и выполнять моделирование при воздействии на них различных сигналов и помех. Пакет обеспечивает возможность всестороннего анализа свойств систем, включая алгоритмы аналоговой и цифровой обработки сигналов, синтеза фильтров, анализа и синтеза систем управления и систем связи.

Пакет SV содержит множество дополнительных средств наращивания и усложнения модели с целью максимального приближения её к реальной аппаратуре. Внутренние средства анализа ограничены осциллографом и анализатором спектра, но в системе имеется возможность записи временной реализации в файл, что позволяет выполнять обработку данных с помощью других программных средств, в том числе, с помощью звуковой карты ПК, что предоставляет возможность прослушивания аудиофайла. Указанная возможность пакета весьма полезна в научно-исследовательской и учебной работе кафедры, осуществляющей НИР и подготовку специалистов в области проектирования и эксплуатации аудиовизуальной техники.

В ходе НИР были созданы пользовательские модели различных устройств, позволяющие проводить исследовательские и лабораторные работы для студентов старших курсов факультета технологий кино и телевидения, при выполнении которых они имеют возможность приобрести навыки имитационного моделирования звуко-технических устройств. Ниже подробно представлена одна из таких моделей – имитационная модель усилителя мощности сигналов звуковой частоты (УМСЗЧ).

Предпосылки к моделированию

Типовой УМСЗЧ содержит схему предварительного усиления, построенную обычно либо на операци-

онном усилителе, либо на нескольких транзисторах, образующих дифференциальный усилитель, где все усилительные каскады работают в линейном режиме и не вносят существенных нелинейных искажений, поэтому при имитационном моделировании они условно могут быть представлены как линейный усилительный блок. В силу того, что любой усилительный каскад является устройством инерционным и имеет конечную полосу частот, следом за блоком предварительного усиления необходимо расположить фильтр нижних частот, обладающий частотой среза на один-два порядка выше граничной частоты усиливаемого сигнала. Однако для сохранения устойчивости работы усилителя при замыкании петли глубокой общей отрицательной обратной связи (ООС) требуется существенное понижение граничной частоты цепи прямого усиления, а значит, и фильтра нижних частот, вплоть до десятков герц. Сочетание низкочастотной цепи прямого усиления с глубокой общей ООС при усилении громких быстро изменяющихся сигналов приводит к перегрузке усилителя по входу, имитировать которую можно с помощью амплитудного ограничителя, установленного на выходе блока предварительного усиления. Этим будет имитироваться механизм, так называемых, переходных динамических искажений.

Сигнал с выхода схемы предварительного усиления поступает на двухтактную схему усиления мощности сигнала. Так как для питания схем двухтактных усилителей, как правило, применяются источники симметричного двухполярного питания, а усиливаемый сигнал подаётся на вход относительно нулевого провода, то на входе каскадов усиления мощности, работающих в режиме класса АВ или В, оказывается сигнал, изменяющийся относительно нулевого потенциала. Следовательно, в одном плече положительная полуволна усиливается, а отрицательная приводит к полному запираению транзисторов, а в другом, наоборот, усиливается отрицательная, а положительная запирает выходные транзисторы. Эквивалентом такой схемы могут служить два однополупериодных выпрямителя, пропускающих одну положительную, а другой – отрицательную полуволны сигнала. Предлагаемая пакетом SV модель выпрямителя предполагает отсечку только отрицательной полуволны, тогда для отсечки положительной полуволны на входе и выходе выпрямителя необходимо разместить инверторы. Сигналы с выходов выпрямительных блоков суммируются и через амплитудный ограничитель подаются в нагрузку. Наличие ограничителя позволяет имитировать искажения, возникающие при перегрузке, обусловленной конечным значением питающего напряжения УМСЗЧ.

Практически любая схема усилителя содержит обратные связи, причём как явные, включённые разработчиками для достижения необходимых технических параметров и качественных показателей, так и неявные, образующиеся благодаря сопротивлению проводников,

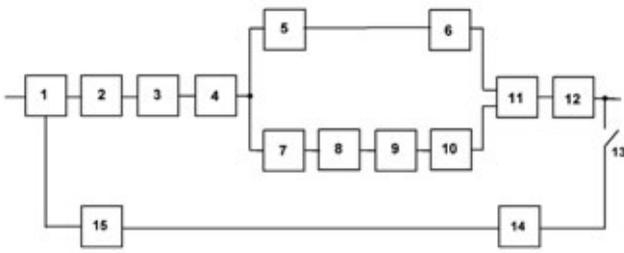


Рис. 1. Имитационная модель УМСЗЧ

межэлектродных и межэлементных ёмкостей и других паразитных факторов. Все они оказывают влияние на работу усилителя и его показатели, приводя к самовозбуждению на высоких частотах, повышению уровня собственных шумов или специфическим искажениям усиливаемого сигнала. Реализация в модели обратной связи может быть осуществлена путём подключения выхода модели через безинерционный усилительный блок и инвертор к дополнительному входу модели, который образуется благодаря использованию на входе двухвходового сумматора.

Инвертор, используемый в цепи обратной связи, гарантирует получение отрицательной обратной связи (при условии отсутствия инверсии на выходе модели). Рассматривать инвертор в комплексе с сумматором и входным усилителем можно как модель дифференциального усилителя.

Структурная схема модели

Схема модели приведена на рисунке 1 [2]. Блоки модели имеют следующее назначение: 1 – двухвходовый сумматор; 2 – линейный усилитель; 3 – амплитудный ограничитель; 4 – фильтр нижних частот; 5 – однополупериодный выпрямитель; 6 – линейный усилитель; 7 – инвертор; 8 – однополупериодный выпрямитель; 9 – инвертор; 10 – линейный усилитель; 11 – двухвходовый сумматор; 12 – амплитудный ограничитель; 13 – выключатель; 14 – линейный усилитель; 15 – инвертор. Все линейные усилители, оба амплитудных ограничителя и фильтр нижних частот являются независимо перестраиваемыми.

Перечисленные выше узлы предназначены для выполнения различных преобразований сигнала. Двухвходовый сумматор 1, инвертор 15 и линейный усилитель 2 образуют функциональный аналог дифференциального усилителя. Фильтр 4 нижних частот служит для ограничения полосы пропускания модели в целях устранения самовозбуждения, обусловленного наличием

задержки и бесконечно широкой полосой пропускания элементов линейных усилителей. Однополупериодный выпрямитель 5 и линейный усилитель 6 имитируют работу плеча усиления положительной полуволны двухтактного выходного каскада. Инвертор 7, однополупериодный выпрямитель 8, инвертор 9 и линейный усилитель 10 имитируют работу плеча усиления отрицательной полуволны двухтактного выходного каскада. На выходе двухвходового сумматора 11 формируется результирующий сигнал с выходов обоих плеч усиления. Амплитудные ограничители 3 и 12 позволяют имитировать искажения, обусловленные ограничением амплитуды сигнала при перегрузке по входу и выходу, соответственно. Линейный усилитель 14 служит для моделирования цепи обратной связи, глубина связи задаётся через его коэффициент передачи (должен быть меньше единицы). Выключатель 13 обеспечивает отключение цепи обратной связи в случаях необходимости исследовательского характера. При этом имитация ограничения рабочего диапазона частот цепи прямого усиления с помощью фильтра 4 и имитация амплитудного ограничения по входу с помощью амплитудного ограничителя 3 в присутствии глубокой общей ООС (линейный усилитель 14 и инвертор 15) позволяют имитировать механизм возникновения так называемых динамических переходных искажений, присущий УМСЗЧ с инерционной цепью прямой передачи, охваченному глубокой общей ООС.

Модель отражает наиболее существенные функциональные преобразования звукового сигнала, подвергающегося усилению по мощности.

Моделирование в программном пакете SystemView 6.0

Разработанная структурная схема модели УМСЗЧ (рис. 1) была реализована и исследована в программном пакете системотехнического моделирования SystemView версия 6.0 [1]. Ниже приведены скриншоты, параметры элементов схемы, настройки программы и результаты экспериментов.

На рисунке 2 представлен скриншот рабочего окна программы, в котором реализована модель УМСЗЧ.

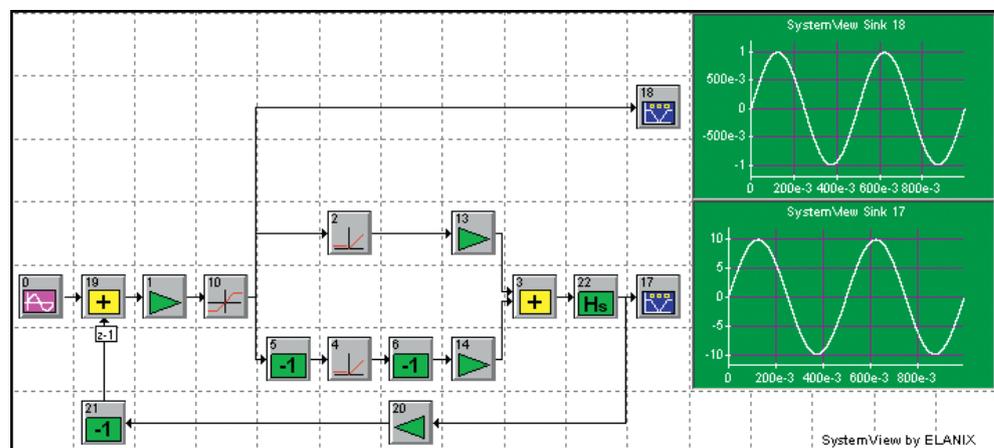


Рис. 2. Имитационная модель УМСЗЧ

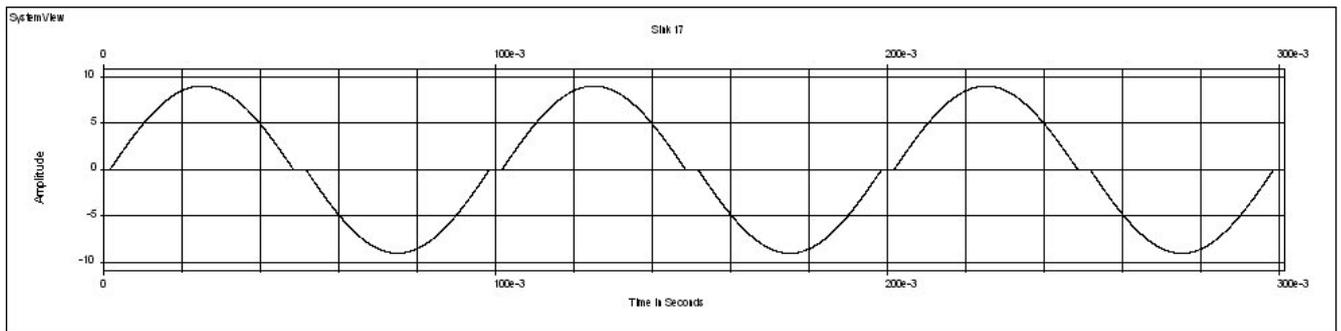


Рис. 3. Форма сигнала на выходе модели УМЗЧ с центральной отсечкой

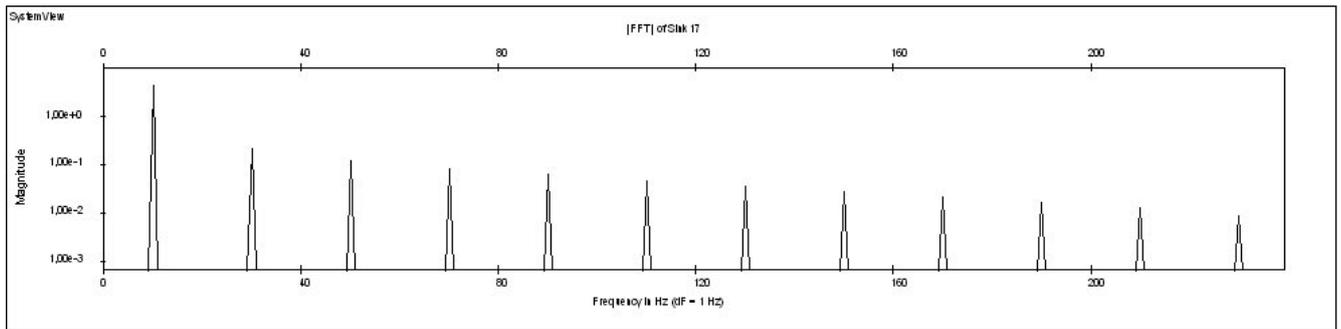


Рис. 4. Спектр сигнала на выходе модели УМЗЧ с центральной отсечкой

Параметры элементов схемы

- Генератор гармонических колебаний (элемент 0). Амплитуда выходного сигнала – $100E-6$ В (0,1 мВ); частота выходного сигнала – 10 Гц; фазовый сдвиг – 0° .
- Линейный усилитель (элемент 1). Коэффициент передачи (Gain) – $10E3$ (10000) раз.
- Амплитудный ограничитель (элемент 10). Максимальное входное напряжение – ± 5 В; максимальное выходное напряжение – ± 5 В.
- Однополупериодные выпрямители (элементы 2 и 4). Напряжение отсечки – 0 В.
- Линейные усилители (элементы 13 и 14). Коэффициент передачи (Gain) – 10.
- Линейный усилитель (элемент 20). Коэффициент передачи (Gain) – 1.
- Сумматоры (элементы 3 и 19).
- Инверторы (элементы 5, 6 и 21).
- Фильтр нижних частот (элемент 22).
- Осциллографы (элементы 17 и 18).

Настройки программы имитационного моделирования

- Частота дискретизации (Sample Rate) – $32,768E3$ (32,768 кГц).
- Количество отсчётов (No. of Samples) – 32768.
- Время начала моделирования (Start Time) – 0 сек.
- Количество циклов (No of System Loops) – 1.

Следует отметить, что при моделировании в SV цепей с обратной связью программа автоматически вносит в них неявную задержку на один такт и помечает её индикатором [z-1], располагаемым на одном из входов элемента, имеющего несколько входов. Большинство

реальных аналоговых систем имеют подобные задержки, но в связи с тем, что они обычно очень малы (по сравнению с постоянной времени замкнутой цепи), при аналитическом анализе ими, как правило, пренебрегают. Однако введение такой задержки при моделировании устройства, имеющего бесконечную ширину полосы пропускания (т. е. его постоянная времени равна нулю), может привести к неустойчивости модели. Поэтому в схему усилителя (рис. 2) введён ФНЧ (элемент 22), ограничивающий полосу пропускания усилителя для предотвращения самовозбуждения.

Результаты экспериментов

Ограниченный объём статьи позволяет привести результаты только одного из многочисленных экспериментов, направленных на исследование работы модели в различных режимах.

Для исследования нелинейных искажений, возникающих в двухтактных усилителях в результате отсечки малых сигналов (из-за неправильно выбранного тока покоя выходного каскада), в свойствах однополупериодных выпрямителей (элементы 2 и 4 на рис. 2) заданы значения напряжения отсечки (Zero Point), равные 0,1 В. Значение коэффициента передачи цепи ООС составило 0,001.

Результаты эксперимента свидетельствуют о возникновении нелинейных искажений, хорошо заметных на осциллограмме сигнала, приведённой на рис. 3. В спектре выходного сигнала присутствуют нечётные гармоники, что свидетельствует о наличии нелинейных искажений симметричной формы (рис. 4). Рассчитанное по стандартной формуле значение коэффициента гармоник составило 6%.

Применение модели УМСЗЧ

Разработанное на функциональном уровне устройство относится к контрольно-измерительной технике и предназначено для имитации функциональной структуры УМСЗЧ в научных и учебных целях.

Модель предназначена для реализации аппаратно-программными средствами и может быть использована для выполнения исследований поведенческого характера, а также для определения количественных и качественных изменений сигнала в различных точках тракта усиления. Возможности независимых перестроек ключевых параметров всех линейных усилителей, обоих амплитудных ограничителей и фильтра нижних частот позволяют исследовать такие важные вопросы проектирования усилителей, как влияние величины петлевого усиления и расположения верхней граничной частоты АЧХ цепи прямого усиления на устойчивость работы усилителя, влияние наличия обратной связи и её глубины на технические параметры и качественные показатели усилителя и т. д.

Возможные области применения модели УМСЗЧ простираются на деятельность в рамках учебного процесса различных общеобразовательных дисциплин кафедры и на деятельность в рамках НИР, выполняемые при изучении дисциплин специализации, а также студентами, обучающимися в магистратуре.

Можно предложить три части общего обращения к модели.

В первой части студенты получают основные навыки работы с пакетом SV, технологией построения имитационных моделей, набором библиотек пакета, основными инструментами редактирования схемы. После краткого знакомства с интерфейсом SV, от студентов требуется выполнить построение модели усилителя в соответствии с заданной в методическом пособии функциональной схемой. Пособие должно содержать подробное описание последовательности действий для создания модели усилителя, определения и просмотра параметров узлов и блоков. Кроме вышесказанного, первая часть должна содержать в себе ряд экспериментов на построенной модели при разомкнутой петле ООС, позволяющих исследовать протекающие в ней процессы при усилении гармонических колебаний, а также изучать влияние параметров опре-

делённых узлов на искажения формы усиливаемого сигнала.

В ходе исследования искажений, вносимых усилителем в исходный гармонический сигнал, студенты также исследуют инструменты частотного и спектрального анализа пакета SV (окно Analysis Window), получая навыки их применения.

Вторая часть содержит эксперименты, основанные на прежней модели, но с введённой в неё цепью ООС. Задачей данного этапа является изучение влияния ООС на коэффициент передачи усилителя и снижение уровня его нелинейных искажений различных видов. Кроме того, каждый эксперимент в данной части делится на два опыта, содержащих измерения для различных значений глубины ООС.

Третья часть содержит эксперименты с реальными звуковыми сигналами, для чего в исследуемую модель вносятся незначительные изменения в соответствии с методическими указаниями. Задачей этого этапа является получение студентами представления о восприятии человеком тех или иных видов нелинейных искажений, возникающих в тракте звукоусиления.

Заключение

Современные методы проектирования радиотехнических систем и устройств, основанные на новейших достижениях в области компьютерного моделирования, позволяют решать проблемы ограниченности времени и ресурсов, необходимости повышенной наглядности и интерактивности процесса современного обучения, существенно сократить трудозатраты на разработку и многократно снизить расходы на изготовление физических макетов.

Использование виртуальных лабораторных комплексов в учебном процессе имеет ряд неоспоримых достоинств, к которым можно отнести создание условий для безопасной и комфортной работы. Кроме того, широкое внедрение системы дистанционного обучения предполагает значительное увеличение времени самостоятельной работы, поэтому использование виртуальных моделей, подобных рассмотренной в статье, позволит, в том числе, повысить эффективность дистанционного обучения. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. *Златин И.Л.* SystemView 6.0 – системное проектирование радиоэлектронных устройств. – М.: «Горячая линия – Телеком», 2006. – 424 с.
2. Патент на полезную модель № 134377 (RU 134377 U1) РФ. МПК H03F 3/00 (2006.01). Модель усилителя мощности сигналов звуковой частоты [Текст] / *Тихонова Л.С., Растрига С.Н.*; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский государственный университет кино и телевидения. – №2013127701/08, 18.06.2013. Опубликовано: 10.11.2013, Бюллетень: № 31.



АНАМОРФОТНЫЕ ОБЪЕКТИВЫ для профессиональной кинематографии



С.Б. Бирючинский, к.ф.-м.н.,
ООО «Оптико-механические системы»

Аннотация

Рассмотрены варианты архитектуры современных киносъёмочных анаморфотных объективов. Проведено сравнение главных потребительских качеств объективов различных конфигураций. Приведены авторские разработки оптических систем для анаморфотной киносъёмки высокой чёткости.

Ключевые слова: объектив, анаморфот, оптическая система, aberrации, разрешающая способность, высокая чёткость, 3D стерео.

■ Разработка оптических систем анаморфотных объективов является одной из наиболее сложных задач в современном оптическом приборостроении для кинематографии. Благодаря использованию большей площади кадра подобные системы обладают рядом преимуществ, в том числе, потенциально большей информационной пропускной способностью.

В анаморфотных афокальных цилиндрических системах обеспечивается сопряжённость изображений только для одной пары плоскостей – бесконечно удалённых плоскостей предметов и изображений. Если же плоскость предметов находится на конечном расстоянии, то в целях обеспечения сопряжённости плоскостей предметов и изображений должна быть нарушена афокальность насадки. Для этого, наряду с дистанционным перемещением сферического объектива, перемещается один из компонентов насадки. Один из недостатков подобного метода заключается в том, что при изменении дистанции происходит изменение анаморфозы системы. Одновременно с этим происходит изменение угловой зависимости анаморфозы. Один из способов решения данной проблемы заключается в размещении системы фокусировки на конечные дистанции перед объективом. Но та-

ANAMORPHIC LENS FOR PROFESSIONAL CINEMA

S. Biryuchinskiy

Abstract

Variants of architecture modern cinema anamorphic lens are considered. Comparison of the main consumer qualities of various configurations lenses is executed. Author's workings out of optical systems for anamorphic high definition filmings.

Keywords: lens, anamorphic, optical system, aberrations, lens resolution, high definition, 3D stereo.

кой способ оправдан лишь в немногочисленных частных случаях слабосветосильных систем. Другой способ заключается в создании компенсаторных компонентов, но при этом архитектура объектива в целом не меняется. Таким образом, в целом, системы с расположением цилиндрических компонентов до апертурной диафрагмы, обладают рядом неустраняемых недостатков.

Если относительные отверстия в обоих сечениях анаморфота равны, то отношение угловых размеров кружков рассеяния в двух сечениях равно отношению фокусных расстояний. Это создаёт разность глубин резко изображаемого пространства в двух направлениях. Теоретически для устранения разности глубин резко изображаемого пространства в разных сечениях анаморфота относительные отверстия объектива в вертикальном и горизонтальном сечении должны быть различными: отношение их величин должно быть равным анаморфозе системы. В том сечении анаморфота, в котором фокусное расстояние больше, относительное отверстие должно быть меньше, и наоборот. Реализуется это с помощью эллиптической диафрагмы. На практике всё обстоит иначе. Во-первых, во всех профессиональных кинообъективах немаловажным является фактор передачи изображения вне диапазо-



Рис. 1. Анаморфотные объективы фирмы Panavision, G Series (USA)

на глубины резкости. Во-вторых, падение относительного отверстия по одному из направлений снижает ранг объектива и, соответственно, его коммерческую ценность. Поэтому, несмотря на все недостатки переднего расположения цилиндрических компонентов, подобная архитектура системы является основной, и другие варианты рассматриваются относительно редко.

Расположение цилиндрических компонентов позади апертурной диафрагмы позволяет существенно уменьшить габариты системы (но при этом страдает бока и светосила системы по одному из направлений). Применение эллиптических апертурных диафрагм позволяет частично скомпенсировать недостатки оптической схемы. Несмотря на некоторое увеличение хроматизма (уменьшается применением особых стёкол), данное решение является наилучшим с точки зрения качества изображения (но не с точки зрения количества передаваемой информации!) по критерию близости к дифракционному пределу, но по ряду причин такое решение применяется только при невозможности получения практически значимого результата (например, приемлемые габариты и масса) классическим способом.

На практике возможно создание объективов, предназначенных специально для работы с анаморфотными насадками (возможно также создание универсальной насадки на всю линейку объективов, включая панкратические). Причём концепция системы не будет изменяться в зависимости от формата кадра, это относится также и к 2/3" трёхматричным камерам и к блокам стереокамер [8–13].

Лидером по производству профессиональных анаморфотных объективов является компания Panavision (USA) [1, 3]. Первые анаморфотные киносъёмочные объективы (Auto Panatar) были выпущены в 1958 г. К настоящему времени компанией выпускается полный спектр анаморфотных систем для профессиональной кинематографии, в том числе, панкратические. На рис. 1, в качестве примера, показаны анаморфотные объективы Panavision G Series. В связи с возросшими требованиями к качеству изображения (4 K киносъёмка) и высокой светосилой большинства объективов все современные системы рассчитываются с учётом фильтров, установленных перед матрицей цифровой



Рис. 2. Анаморфотные объективы фирмы ARRI/ZEISS (Master Anamorphic Primes)

видеокамеры. Аберрации указанных фильтров могут быть практически полностью устранены без усложнения оптической системы объектива, но применение на плёночных камерах становится менее эффективным (данный недостаток может быть скомпенсирован внешним корректором, но в объективах Panavision это не применяется).

Так как потребности в широкоэкранных кинематографических системах увеличивались и совершенствовались технологии оптического производства, то это привело к выходу на данный рынок ещё нескольких компаний. Одной из них является фирма ARRI. На рис. 2 показан один из объективов ARRI/ZEISS (Master Anamorphic Primes). Отличительными особенностями объективов является комбинированная оптическая схема расположения сферических и цилиндрических линз, что позволило достичь высокого качества изображения в сочетании с приемлемым наружным диаметром объектива, а также наличие электрической системы передачи данных (рис. 2, в видеокамеру передаются данные о текущем положении диафрагмы и дистанции фокусировки) на байонетном соединении (что с другой стороны делает объектив менее универсальным и менее отказоустойчивым). Объектив также отличается хорошим боке в сочетании с его овальной формой. Следует также отметить высокую светокоррекцию системы (для обеспечения совместимости с другими объективами) за счёт специально оптимизированных просветляющих покрытий.

Традиционно высокими потребительскими качествами обладают объективы фирмы Cooke Optics (UK). Линейка



Рис. 3. Анаморфотный объектив фирмы Cooke Optics (UK)



Рис. 4. Панкратический анаморфотный объектив фирмы Angénieux (France)

анаморфотных объективов (анаморфоза 1:2) включает семь систем с фиксированными фокусными расстояниями от 25 мм до 135 мм [1, 4]. Отличительной особенностью объективов является одинаковый внешний габарит изделий, причём максимальный диаметр корпуса составляет стандартные 110 мм. Имея классическую архитектуру оптической системы (переднее расположение цилиндрической оптики) за счёт применения тонких компонентов и особых стёкол, стало возможным изготовление достаточно компактной системы в целом. Все анаморфотные объективы данной серии являются мягкорисующими, но при этом обладают достаточно высокой информационной пропускной способностью в целом. Асферические компоненты не применяются из-за возможных артефактов в изображении и некоторых технологических сложностей. Объективы обладают ходом лучей, близким к телецентрическому (обязательное требование для качественной съёмки на любую цифровую камеру), а также достаточно низким виньетированием (в ущерб качеству изображения на краю). Байонетная часть объектива также обладает дополнительной механической защитой последней линзы в системе.

Не менее значимым результатом обладают объективы фирмы Vantage Film (Germany). Компания выпускает объективы (торговая марка HAWK) с анаморфозой 1:2 и 1:1.3 для различных форматов кадра [5].

Анаморфотные объективы могут также быть исполнены и панкратическими. В большинстве случаев это достигается задним расположением цилиндрических элементов, и, несмотря на проявляющиеся недостатки этих систем, они в настоящее время применяются на практике [13, 14]. В основном это связано как с высоким достигаемым качеством изображения при малых габаритах системы, так и большим диапазоном кратности смены фокусного расстояния. На рис. 4 показан анаморфотный объектив фирмы Angénieux (France) с коэффициентом анаморфозы 1:2 [1]. Диапазон фокусных расстояний 56–152 мм при T-Stop 4. Данный объектив отличается высоким качеством изображения и достаточно компактными габаритами.

Грамотное применение асферических компонентов в сочетании с особыми стёклами и тонкими линзами по-



Рис. 5. Анаморфотный объектив фирмы Service Vision (Spain)

зволило компании Service Vision (Spain) стать технологическим лидером в области производства анаморфотных кинообъективов [1, 2].

Линейка объективов с фиксированным фокусным расстоянием состоит из четырнадцати систем с фокусными расстояниями от 20 мм до 300 мм (см, например, рис. 5). Имея наружный диаметр корпуса всего 95 мм, объективы обладают телецентрическим ходом лучей, малой дисторсией, отсутствием искажений при перефокусировке и механизмом внутренней фокусировки. Диагональ кадра составляет 31.14 мм. Особо следует отметить объектив с фокусным расстоянием 20 мм, являющийся лучшим в мире в данной категории.

На территории РФ проектирование и производство профессиональных анаморфотных кинообъективов осуществляется только фирмой «Оптика-Элит» [6]. На рынке представлено 11 объективов с фокусными расстояниями от 24.5 мм до 1040 мм (анаморфоза 1:2). Особенно следует отметить уникальность объективов с фокусным рас-



Рис. 6. Анаморфотный объектив с фокусным расстоянием 40 мм (Оптика-Элит, Россия)



Рис. 7. Анаморфотный объектив с фокусным расстоянием 250 мм (Оптика-Элит, Россия)

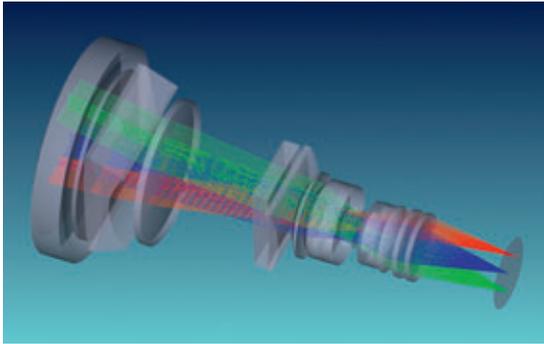


Рис. 8. Оптическая схема анаморфотного объектива с фокусным расстоянием 50 мм и скрещенным расположением цилиндров

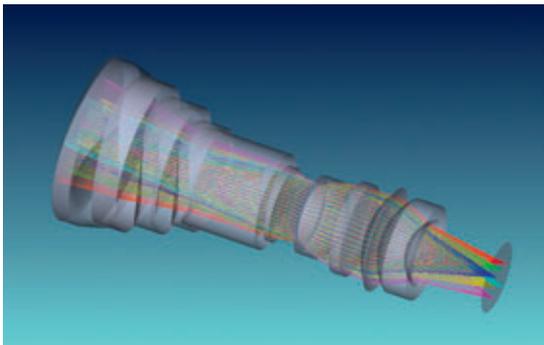


Рис. 10. Оптическая схема модифицированного анаморфотного объектива с фокусным расстоянием 50 мм и скрещенным расположением цилиндров

стоянием 24 мм (относительное отверстие 1:1.8), а также панкратических объективов 50–160 мм и 240–1040 мм. На рис. 6 и рис. 7 представлены объективы с фокусными расстояниями 40 мм и 250 мм, соответственно. Коэффициент анаморфозы составляет 1:2. Данные оптические схемы спроектированы как «мягкорисующие» и пригодны как для плёночной (35 мм), так и для цифровой киносъёмки современными камерами (4К). Отличительными особенностями данных объективов являются высокое качество изображения, высокая эксплуатационная надёжность и ремонтпригодность, а также хорошее соотношение цены и качества.

На рис. 8 показана оптическая схема анаморфотного объектива с фокусным расстоянием 50 мм (относительное отверстие 1:2) и скрещенным расположением цилиндров [6]. Применяемые автором методики оптимизации позволили заметно уменьшить хроматизм и кривизну поля. Данный объектив за счёт сочетания сферической и цилиндрической оптики обладает значительно лучшими массо-габаритными характеристиками и улучшенным качеством изображения (лучший анаморфотный объектив, производимый на территории РФ). Отсутствие асферических поверхностей позволило получить хорошее соотношение цены к качеству системы. График функции передачи модуляции объектива показан на рис. 9.

Непрерывно растущие требования к качеству изображения кинообъективов и улучшению их потребительских

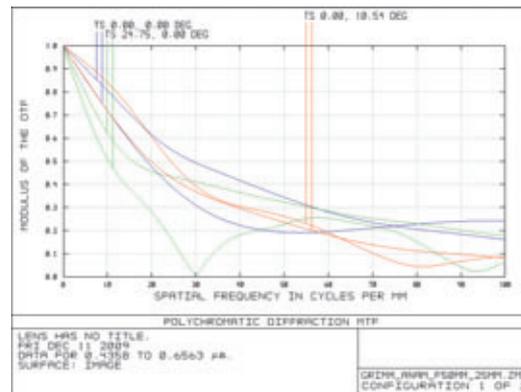


Рис. 9. График полихроматической ФПМ объектива рис. 8

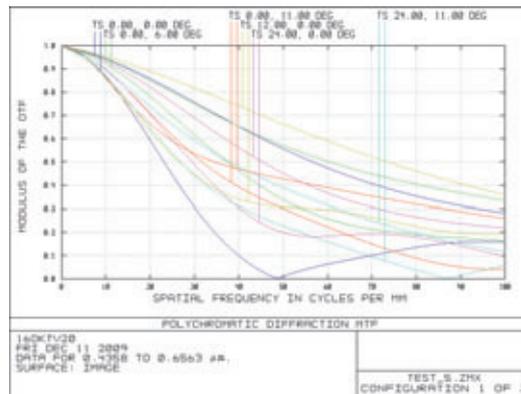


Рис. 11. График полихроматической ФПМ объектива рис. 8

характеристик вынуждают применять более сложные оптические схемы (соответственно методика их расчёта также усложняется), причём наличие асферических поверхностей не всегда является достаточным для решения поставленной задачи. На рис. 10 показана разработанная автором анаморфотная оптическая схема, являющаяся глубокой переработкой схемы рис. 8. Главным отличием новой системы, помимо улучшенного качества изображения (рис. 11), является неизменность анаморфозы, дисторсии (около 2%) и масштаба изображения при перефокусировке. Однако сложность производства тонких оптических компонентов и узлов точной механики (нелинейно перемещаются четыре компонента) не позволяет изготавливать подобные объективы на территории РФ.

Высокая стоимость анаморфотных объективов привела к необходимости разработки универсальных анаморфотных насадок. Одна из них показана на рис. 12 [15]. Данные решения редко применяются в профессиональной киносъёмке, но в некоторых случаях (особенно это относится к малогабаритным объективам) могут давать приемлемый результат. Подобные насадки также могут существовать и в панкратическом исполнении (см, например, [7]).

Другим примером эффективного применения анаморфотных насадок является авторская разработка конвертера форматов с анаморфированием изображения (рис. 13). Конвертер предназначен для работы с практически любыми объективами формата 35 мм и работает с трёхма-

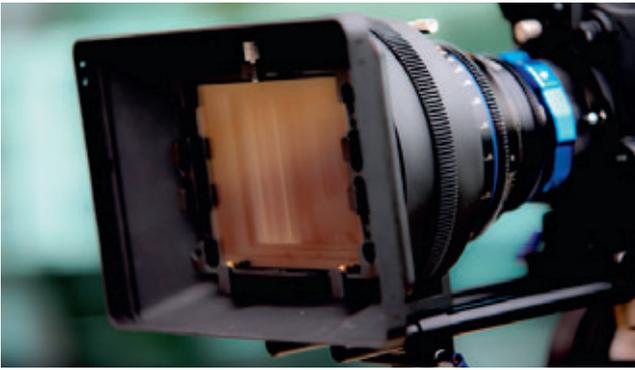


Рис. 12. Анаморфотная насадка фирмы Letus Corporation (USA)

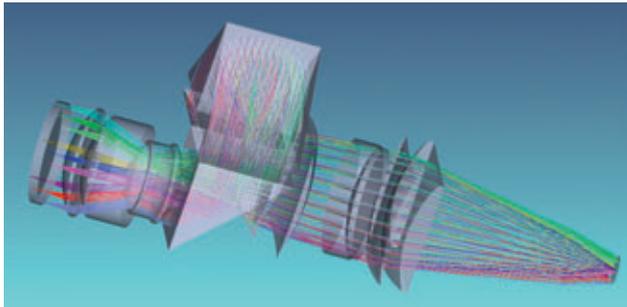


Рис. 13. Оптическая схема анаморфотного конвертера форматов кадра

тричной камерой 2/3" (байонет В4). На выходе получается анаморфированное изображение с коэффициентом анаморфозы до 1:2. Призмная система позволяет минимизировать габариты прибора. Отличительной особенностью данной системы является высокая светосила, хорошее качество изображения по всему полю. Возможность применения эллиптических диафрагм позволяет эффективно контролировать боке системы в целом (однако по сравнению с классическими системами будут некоторые отличия). Теоретически возможно также построение системы с частичной коррекцией aberrаций стандартных кинообъективов (в основном дисторсии и сферической aberrации).

Необходимость изменения базиса стереосъёмки привела к созданию нового класса объективов с внутренней ромбической призмой. На рис. 14 показана авторская разработка анаморфотного блока стереосистемы. Данная оптическая схема позволяет изменять стереобазис непрерывным образом путём поворота стереоблоков с независимым поворотом цилиндрических компонентов. Необходимость разработки данной системы вызвана неудовлетворительной работоспособностью внешних призмных систем с широкоугольными объективами. Подобные стереоблоки могут применяться как в составе специализированных двухматричных камер, так и для съёмки на одну матрицу большего формата. Высокие значения относительных отверстий (до 1:4) при малом световом диаметре (не превышает диагональ кадра), в сочетании с высоким качеством изображения и ходом лучей, близким к телецентрическому, позволяет эффективно использовать объективы для 4 K съёмки на каждый стереоблок.

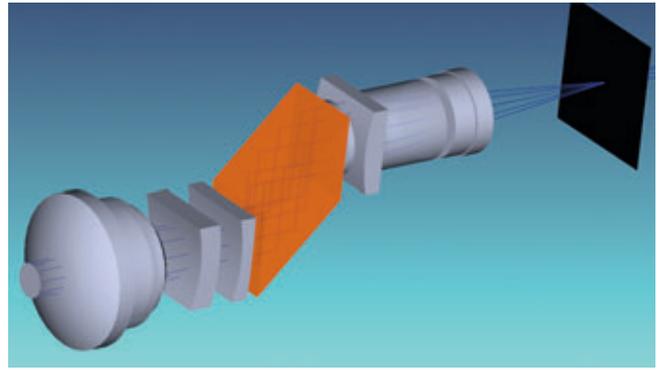
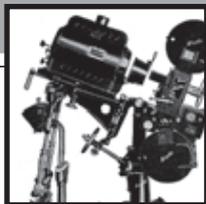


Рис. 14. Оптическая схема блока анаморфотного стереообъектива со смещением оптической оси

В настоящее время в связи с удешевлением технологии производства асферической оптики анаморфотные системы развиваются как в сторону увеличения пропускаемого количества информации (например, для 4K (8K) съёмки), так и уменьшения массо-габаритных характеристик. Совершенствование механической составляющей изделия позволяет эффективно использовать архитектуру новых оптических систем с нелинейно перемещаемыми компонентами. Ожидается также появление полупрофессиональных анаморфотных объективов для съёмки низкобюджетных кинофильмов. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Film and Digital Times Apr. 2013, Issue 53, p. 24–31. (www.fdtimes.com).
2. Servicevision – FDTimes Reprint, Film and Digital Times June. 2014. (www.fdtimes.com).
3. www.panavision.com
4. www.cookeoptics.com
5. www.vantagefilm.com
6. www.optica-elite.com
7. David A. Grafton, «Variable ratio anamorphic lens», Patent US 6181482 B1.
8. Jannick P. Rolland, Alexandra Rapaport, and Myron W. Krueger, «Design of an anamorphic fisheye lens», SPIE Vol. 3482 • 0277-786X/98.
9. M. D. Robinson and D. G. Stork, «Joint design of lens system and digital image processing», Proc. SPIE 6342, 63421G (2006).
10. Matt Cowan, «Digital Cinema Resolution – Current Situation and Future requirements», Entertainment Technology Consultants, 2002.
11. Milton Laikin, «Lens Design», Fourth Edition, CRC Press 2006.
12. Biryuchinskiy S., Melnikov K. Anamorphic photo detector optimization // IEEE Xplore, 10.1109/ICUMT.2012.6459736.
13. A. Cifuentes; A. Valles, «Design of a rear anamorphic attachment for digital cinematography», Proc. SPIE 7100, Optical Design and Engineering III, 71000Q (September 27, 2008)
14. European Patent EP 1779167 B1.
15. Clinton Harn, «Letus35 launch high quality Anamorphic lens adapter», www.newsshooter.com, September 10th, 2013.



АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ И КОРРЕКЦИИ РАЗНОМАСШТАБНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ СТЕРЕОПАРЫ



В.Г. Чафонова, аспирант, И.В. Газеева, к.т.н., Г.В. Тихомирова, д.т.н.,
СПбГУКиТ

Аннотация

В статье описывается разработанный авторами алгоритм автоматизации контроля и коррекции разномасштабности изображений стереопары с использованием цифровой обработки, реализованный в программной среде Matlab и позволяющий также совместить изображения стереопары по желаемому объекту. Алгоритм основан на нахождении сопряжённых ключевых точек и вычислении расстояния между ними.

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

■ Перспективы российского стереокино зависят, прежде всего, от качества создаваемых стереофильмов [7]. Ошибки в стереоизображениях могут вызывать у зрителей неприятные ощущения (боль в глазах, головокружение и т.д.). Поэтому до принятия решения о показе любого стереофильма необходима техническая экспертиза данного фильма, на основании которой следует определять, можно ли допустить

AUTOMATION OF THE CONTROL AND CORRECTION THE DISCREPANCIES IN SCALES OF STEREOPAIR IMAGES

V. Chafonova, I. Gazeeva, G. Tihomirova

Abstract

The article is devoted to algorithm of the automation of the control and correction the discrepancies in scales of left and right images using digital processing and generated in the computing environment Matlab, that also allows to assemble stereopair. The algorithm is based on finding matched points and calculating the distance between them.

Keywords: algorithm, stereo image, stereopair images, scale of the image, vertical and horizontal parallax, digital image processing, pictures assembling.

его на кинорынок, и если можно, то на экранах каких размеров его нужно показывать. В связи с этим разработка алгоритмов, способных контролировать и корректировать ошибки, допущенные при формировании изображений стереопары, является весьма актуальной задачей.

Выполнение требований к величине параллакса – одно из главных условий формирования стереоизо-



(а)

(б)

Рис. 1. Исходные кадры с наличием разномасштабности: левый (а), правый (б)



Рис. 2. Анаглифное изображение, образованное наложением левого и правого кадров стереопары без коррекции разномасштабности изображений

бражения, комфортного для восприятия. Помимо того, что в изображениях стереопары должен отсутствовать вертикальный параллакс, горизонтальные параллаксы объектов, воспринимаемых в предэкранном и заэкранном пространствах, не должны превышать своих допустимых значений [3, 4], а горизонтальный параллакс объектов на изображениях, расположенных в плоскости рамп (или экрана), должен быть равен нулю [5]. Важную роль играет качество совмещения левого и правого кадров, так как при неточном совмещении изображений возникнут нежелательные параллаксы. При этом нежелательный вертикальный параллакс может возникнуть не только вследствие неточного совмещения изображений, но также по причине разномасштабности изображений стереопары. Разномасштабность изображений может возникнуть, если при стереосъемке одна из камер расположена дальше другой от снимаемого объекта, или если у используемых

при съемке камер рассогласованы фокусные расстояния объективов. Особенно это становится актуальным при стереосъемке двумя камерами с неоткалиброванными объективами и при синхронном изменении фокусных расстояний (зуммировании).

В настоящее время существуют различные программы по совмещению и обработке изображений стереопары, однако коррекция разномасштабности изображений в большинстве подобных программ отсутствует, а выставление величины параллаксов осуществляется чаще всего «вручную», и при этом точность совмещения изображений невелика, поскольку во многом зависит от субъективного восприятия человека, формирующего стереопару.

В качестве примера рассмотрим возможность коррекции разномасштабности изображений и совмещения кадров стереопары в программе StereoPhotoMaker (разработчики Masuji Suto, David Sykes). В данной программе эти операции могут быть выполнены двумя способами.

Первый способ – совмещение и коррекция разномасштабности изображений в «автоматическом режиме». При этом совмещение изображений осуществляется не по желаемому объекту, а по объекту, расположенному в центре кадра и на переднем плане снимаемой сцены. А коррекция разномасштабности, особенно при большой разнице масштабов, зачастую не идеальна.

Второй способ – «ручной режим». В данном случае точность коррекции разномасштабности изображений и совмещения стереопары, так же, как и в других программах, во многом зависит от зрения человека, формирующего стереопару.

Для проверки качества коррекции рассогласования масштабов и совмещения изображений стереопары в программе StereoPhotoMaker, совместим в автоматическом режиме изображения, полученные съемкой камерами с несогласованными фокусными расстояниями объективов (рис. 1). На рис. 2 показана исходная стереопара, состоящая из изображений с явно заметной



Рис. 3. Анаглифное изображение стереопары (а), сформированное из исходных разномасштабных изображений в автоматическом режиме программы StereoPhotoMaker, и его фрагмент (б)

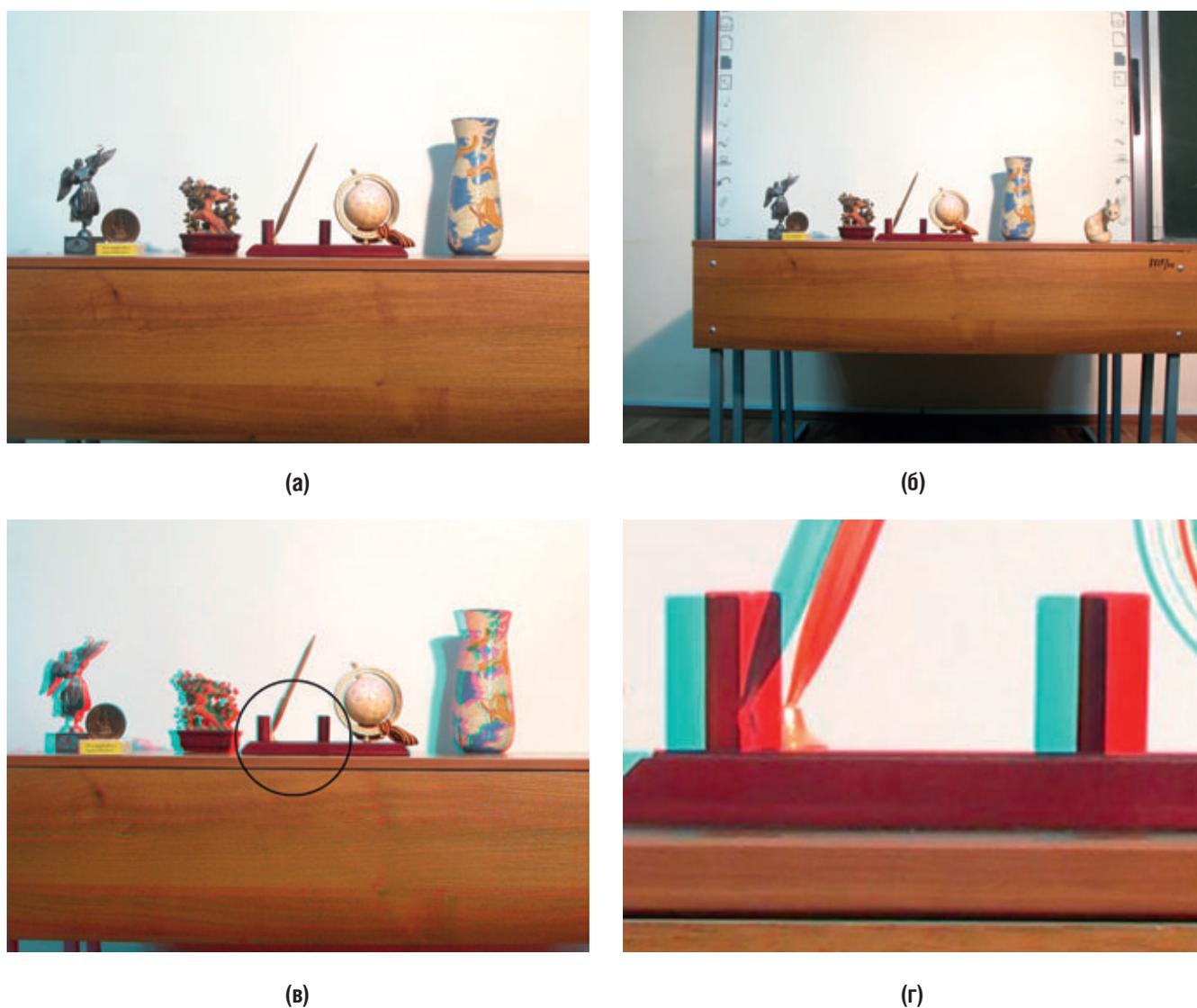


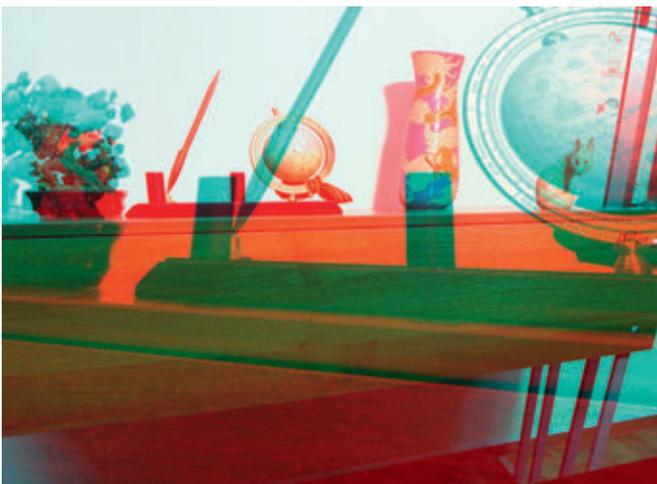
Рис. 4. Исходные левый (а), правый (б) кадры стереопары и итоговое анаглифное изображение стереопары, сформированное в автоматическом режиме программы StereoPhotoMaker (в), его фрагмент (г)



(а)



(б)



(в)

Рис. 5. Исходные левый (а), правый (б) кадры стереопары и итоговое анаглифное изображение стереопары, сформированное в автоматическом режиме программы StereoPhotoMaker (в)

разномасштабностью. На рис. 3, а показана итоговая стереопара, сформированная в автоматическом режиме программы StereoPhotoMaker.

Вертикальный параллакс на представленной стереопаре всё же сохранился (рис. 3, б), а изображения оказались совмещены по объекту, расположенному на переднем плане снимаемой сцены. При просмотре такого стереоизображения все объекты будут восприниматься только в заэкранном пространстве, что ухудшит его зрелищность.

Выполним также коррекцию рассогласования масштабов других изображений стереопары, имеющих ещё более значительную разномасштабность, и их совмещение.

На рис. 4, а, б, и 5, а, б представлены исходные кадры стереопары; на рис. 4, в и 5, в – полученные стереопары, сформированные в автоматическом режиме программы StereoPhotoMaker.

Как видно из рис. 5, в, вместо выполненной коррекции рассогласования масштабов на итоговой стереопаре возник значительный перекося кадров. Таким образом, автоматический режим совмещения изображений стереопары в большинстве существующих программ не всегда даёт приемлемый результат, а разработка алгоритмов измерения и коррекции разномасштабности весьма актуальна.

Существуют несколько методов определения величины разномасштабности изображений. Одни из наиболее распространённых – метод фазовой корреляции в логарифмических полярных координатах модулей спектров изображений [14] и корреляционный подход с использованием множества шаблонов [6]. Однако, в данном случае должна применяться база данных изображений искомого объекта при различном коэффициенте масштабирования, и при увеличении числа шаблонов существенно возрастает время, необходимое для выполнения коррекции рассогласования изображений, а также объём памяти для хранения набора шаблонов [10].

Наиболее перспективным способом контроля и коррекции разномасштабности изображений, на наш взгляд, является метод на основе поиска ключевых точек. Однако применительно к стереопаре необходимо учитывать, что изображаемые объекты, в зависимости от их расположения по глубине сцены, имеют различный горизонтальный параллакс. Поэтому для получения точного результата целесообразно ограничивать область поиска ключевых точек и выбирать их только для объекта, находящегося в одной плоскости дистанций. Кроме того, так как при просмотре стереоизображения основное внимание зрителей направлено на объекты, воспринимающиеся в плоскости рамп, то и коррекция рассогласования масштабов должна быть наиболее точно выполнена именно для объектов с нулевым горизонтальным параллаксом.

Предлагаемый нами алгоритм коррекции разномасштабности изображений стереопары, реализованный в программной среде Matlab, расширяет возможности цифровой конвергенции изображений стереопары, ме-

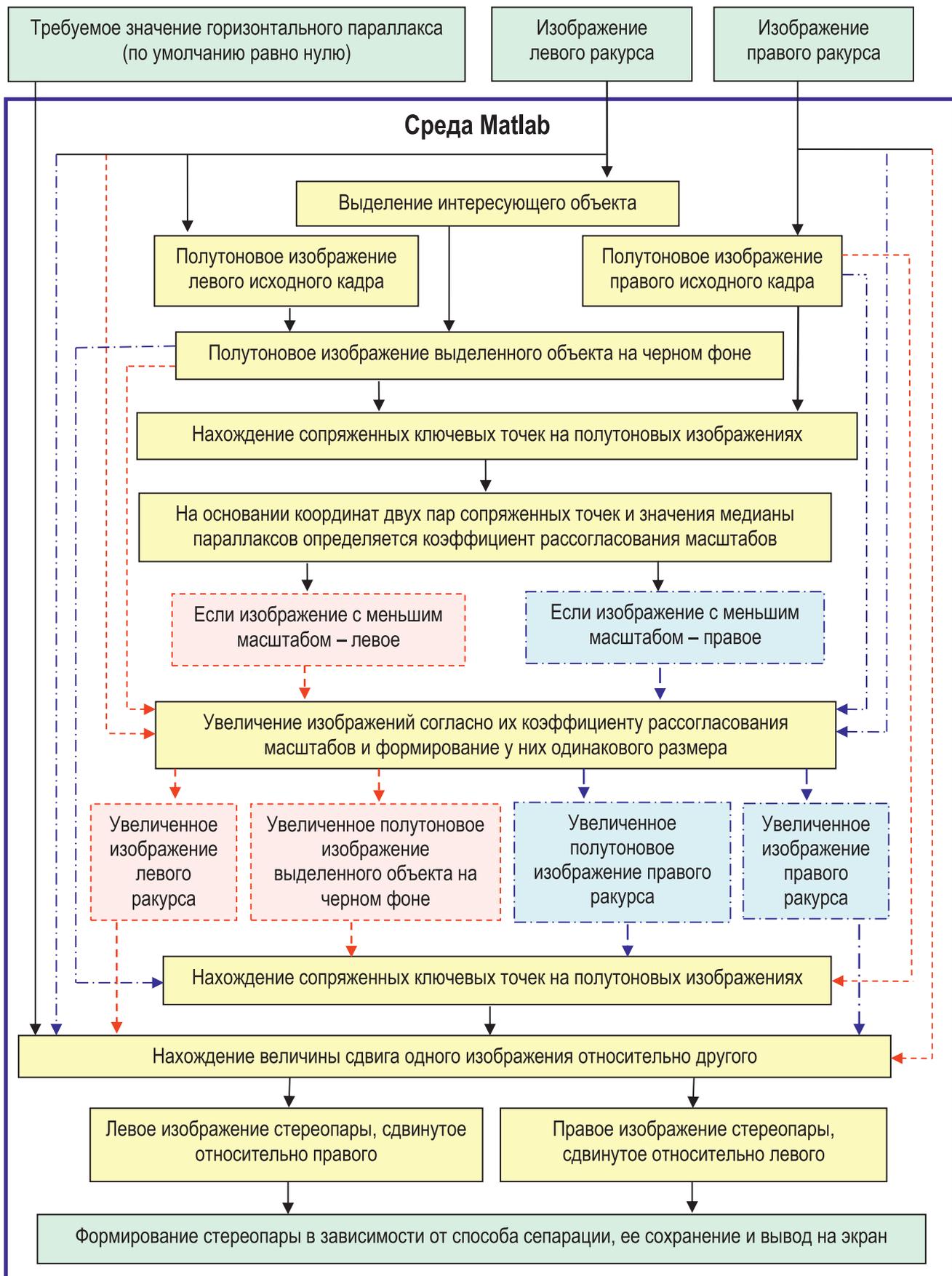


Рис. 6. Схема алгоритма формирования стереопары с коррекцией разномасштабности изображений для случая, когда изображение с меньшим масштабом увеличивается до более крупного изображения



Рис. 7. Выделение объекта

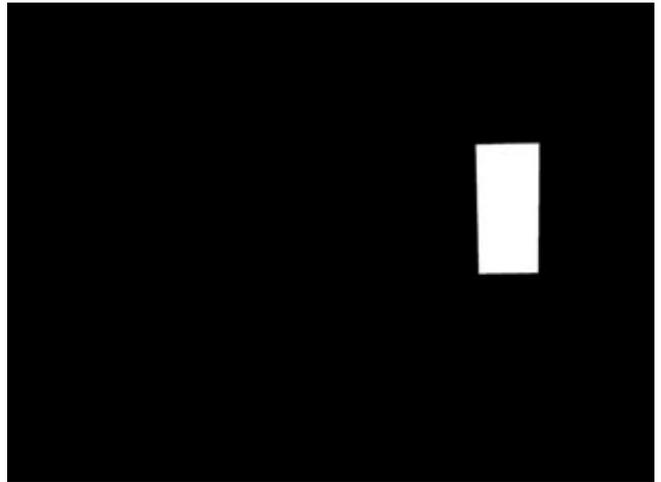


Рис. 8. Бинарная маска выделенного объекта



(а)



(б)

Рис. 9. Полутоновые изображения исходных кадров: левое (а), правое (б)

тоды которой описаны в статье [1], и позволяет с высокой точностью проконтролировать, а также исправить разномасштабность изображений по объекту, который по замыслу должен быть расположен в плоскости рампы или в другой плоскости дистанций.

Указанный алгоритм основан на выделении объекта в изображении, обнаружении ключевых точек на выделенном изображении объекта и на другом кадре стереопары при помощи детектора точечных особенностей, а также определении величины коэффициента рассогласования масштабов и сдвига одного изображения относительно другого. При этом коррекция разномасштабности данным алгоритмом может производиться как путём увеличения размера изображения с меньшим масштабом, так и путём уменьшения размера изображения с более крупным масштабом. В последнем случае итоговое изображение будет иметь уменьшенное разрешение.

Схема алгоритма формирования стереопары с коррекцией разномасштабности изображений для случая, когда изображение с меньшим масштабом увеличивается

до более крупного изображения, представлена на рис. 6. Рассмотрим его подробнее.

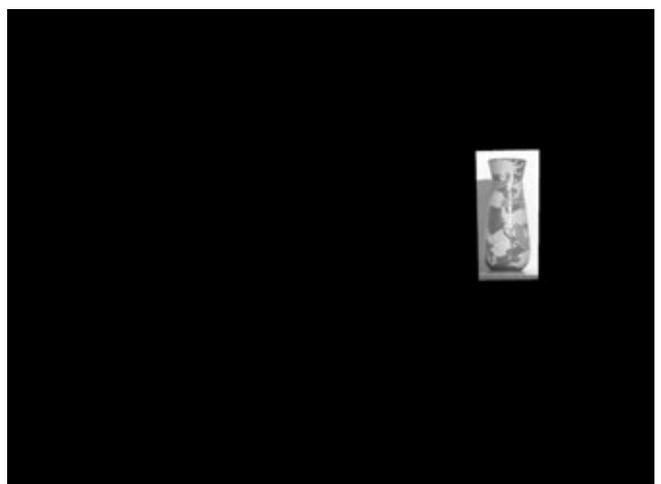


Рис. 10. Полутоновое изображение объекта, выделенного ранее на левом кадре

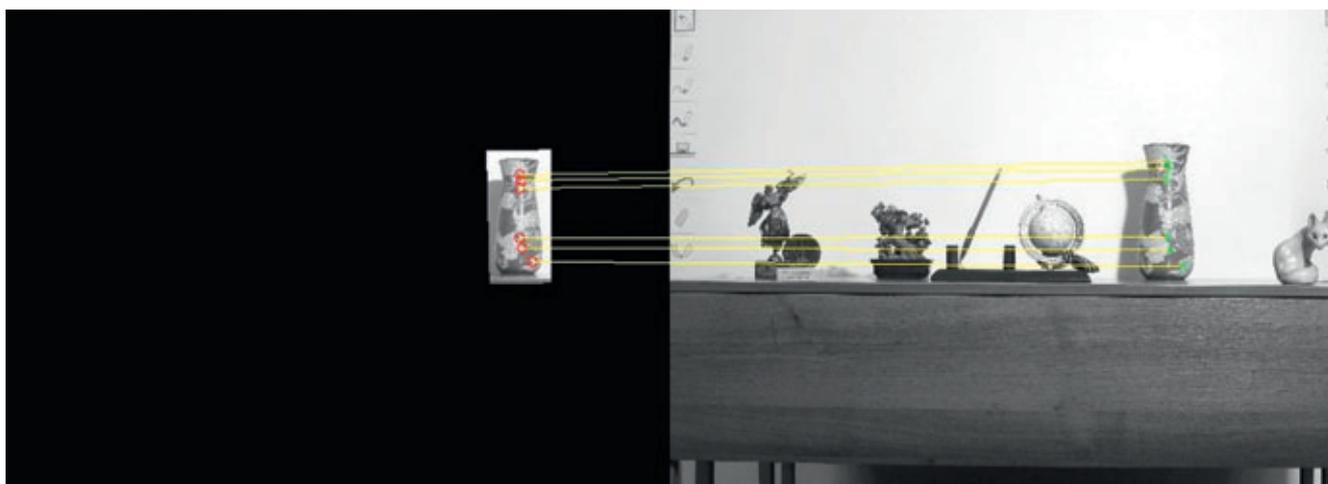


Рис. 11. Ключевые точки полутонового изображения выделенного объекта на левом кадре, сопряжённые с ключевыми точками полутонового изображения правого кадра стереопары

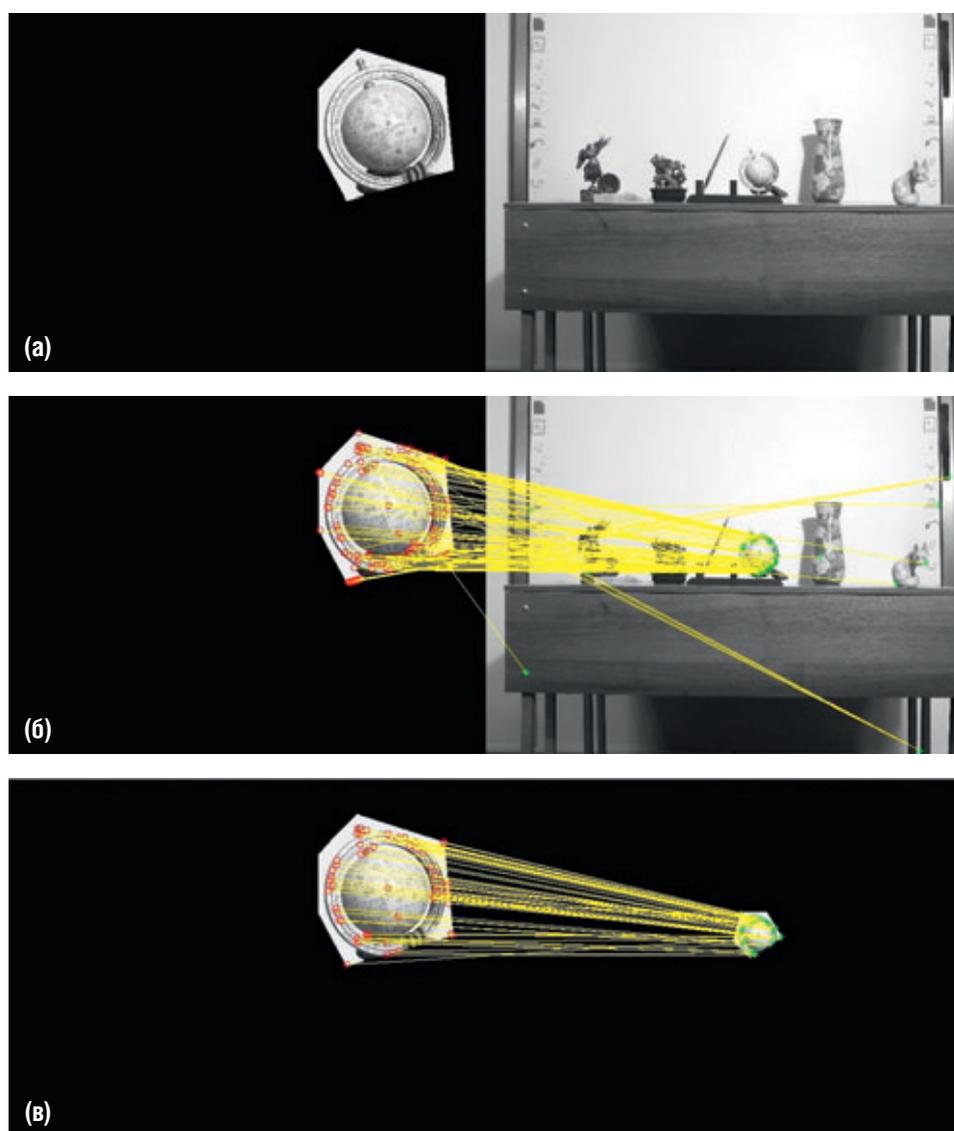


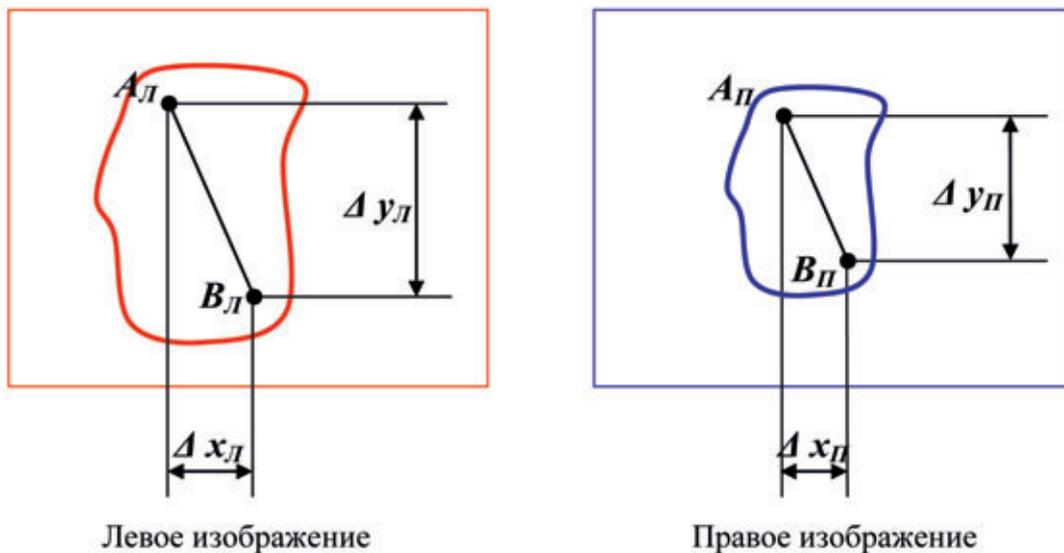
Рис. 12. Обнаруженные ключевые точки: при помощи детектора точечных особенностей FAST (а), при помощи детектора SURF (б) и с использованием алгоритмов SURF и RANSAC одновременно (в)

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

Шаг 2. Левое изображение стереопары выводится на экран, при помощи курсора выделяем объект (или часть объекта), который по замыслу должен быть расположен в плоскости рампы или в другой плоскости дистанций (рис. 7). 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. 8).

Шаг 3. Левый и правый исходные кадры преобразуются в полутоновые изображения (рис. 9). При этом, если исходные кадры стереопары уже являются полутоновыми изображениями, алгоритм не выполняет данный шаг.

Шаг 4. Матрица левого полутонового изображения и бинарная маска объекта, выделенного ранее на левом исходном кадре, перемножаются поэлементно. Таким образом, образуется матрица полутонового изображения интересующего нас объекта (рис. 10).



Левое изображение

Правое изображение

Рис. 13. Схема, поясняющая определение коэффициента рассогласования масштабов

Шаг 5. При помощи детектора точечных особенностей FASTdetector (Features from Accelerated Segment Test [15]) на полутоновом изображении выделенного объекта и на правом полутоновом изображении определяются соответствующие друг другу ключевые точки (рис. 11).

Однако, при достаточно большой разнице масштабов (рис. 5, а и 5, б), детектор точечных особенностей FAST может не обнаружить парные ключевые точки (рис. 12, а). В данном случае предлагаемый алгоритм будет использовать детектор SURF (Speeded Up Robust Features [11, 13]). При этом, для того чтобы исключить возможность обнаружения большого количества нежелательных посторонних точек (рис. 12, б), применяется метод оценки параметров модели на основе случайных выборок RANSAC (RANdom SAmple Consensus [8]) – рис. 12, в. Дальнейшая последовательность действий останется без изменений.

Шаг 6. С помощью значений координат двух точек выделенного ранее объекта на одном кадре и координат аналогичных точек на другом кадре (рис. 13), отобранных на основании значения медианы параллаксов, определяется коэффициент рассогласования масштабов M .

Обозначим x_{A_L} и y_{A_L} – координаты вдоль осей x и y точки **A** левого изображения стереопары; x_{B_L} и y_{B_L} – координаты вдоль осей x и y точки **B** левого изображения стереопары; координаты этих же точек для правого изображения обозначим $x_{A_П}$ и $y_{A_П}$, $x_{B_П}$ и $y_{B_П}$, соответственно.

Расстояние между ключевыми точками **A** и **B** находится следующим образом:

$$\Delta x_L = x_{B_L} - x_{A_L} \quad (1)$$

$$\Delta x_П = x_{B_П} - x_{A_П} \quad (2)$$

$$\Delta y_L = y_{B_L} - y_{A_L} \quad (3)$$

$$\Delta y_П = y_{B_П} - y_{A_П} \quad (4)$$

$$A_L B_L = \sqrt{\Delta x_L^2 + \Delta y_L^2} \quad (5)$$

$$A_П B_П = \sqrt{\Delta x_П^2 + \Delta y_П^2} \quad (6)$$

С учётом найденных расстояний между ключевыми точками **A** и **B** на левом кадре $A_L B_L$ и правом кадре $A_П B_П$ стереопары находится коэффициент рассогласования масштабов:

если $A_L B_L > A_П B_П$,

$$M = \frac{A_L B_L}{A_П B_П}; \quad (7)$$

если $A_L B_L < A_П B_П$,

$$M = \frac{A_П B_П}{A_L B_L}. \quad (8)$$

При полном согласовании масштабов левого и правого изображений стереопары $A_L B_L = A_П B_П$ и $M = 1$.

Коэффициент рассогласования масштабов может быть найден и согласно выражениям (9), (10), но только в том случае, когда изображения стереопары не имеют наклона:

если $\Delta y_L > \Delta y_П$,

$$M = \frac{\Delta y_L}{\Delta y_П}; \quad (9)$$

если $\Delta y_L < \Delta y_П$,

$$M = \frac{\Delta y_П}{\Delta y_L}. \quad (10)$$

В данном случае точки **A** и **B** необязательно должны быть расположены в одной плоскости дистанций, а значит, разномасштабность может быть определена по всему полю изображения.

Шаг 7. В соответствии с полученной величиной коэффициента рассогласования масштабов изображе-

ний (M), если необходимо, корректируется размер одного из изображений стереопары. Коррекция масштаба изображения выполняется с помощью аффинного пространственного преобразования, согласно которому происходит изменение пространственного расположения пикселей.

При прямом преобразовании координаты каждого пикселя выходного изображения (x' , y') могут быть найдены через координаты пикселей входного изображения (x , y) с помощью матричного умножения [12]:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = T \times \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где $\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix}$ – матрица-столбец, задающая координаты каждого пикселя преобразованного изображения, дополненная единицей;

$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}$ – матрица-столбец, задающая координаты каждого пикселя исходного изображения, дополненная единицей.

T – аффинная матрица преобразования. В случае преобразования масштаба:

$$T = \begin{pmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Поскольку прямое аффинное преобразование требует значительных вычислительных затрат [2], то удобнее пользоваться обратным аффинным преобразованием:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = T^{-1} \times \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

где T^{-1} – обратная матрица аффинного преобразования, которая вычисляется на основании матрицы прямого преобразования T и единичной матрицы E :

$$T \times T^{-1} = E, \quad (13)$$

где

$$E = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Для вычисления яркости выходных пикселей преобразованного изображения по умолчанию применяется билинейная интерполяция. Однако в алгоритме имеется возможность выбрать другой метод интерполяции, если это необходимо.

Как известно, билинейная интерполяция [16] рассматривает квадрат 2×2 известных пикселей, окружающих неизвестный. В качестве интерполированного значения яркости используется взвешенное усреднение этих четырёх пикселей. Данный метод, по сравнению с интерполяцией нулевого порядка [9] (т. н. методом ближайшего соседа), позволяет существенно снизить заметность растровой структуры и зазубренность наклонных границ при большом увеличении и не требует значительных вычислительных затрат как, например, бикубический метод интерполяции [9]. Таким образом, происходит коррекция рассогласования масштабов левого и правого кадров стереопары, а также полутонового изображения правого ракурса и полутонового изображения объекта, выделенного ранее на левом кадре. На рис. 14 представлены полученные левый и правый кадры стереопары.

Для контроля выполненной коррекции разномасштабности шаги с 5 по 7 повторяются над полученными изображениями. Если $M=1$, то далее выполняется совмещение полученных изображений.

Шаг 8. При использовании детектора точечных особенностей на полутоновом изображении выделенного объекта левого ракурса и на полутоновом изображении правого ракурса стереопары, полученной после коррекции рассогласования масштабов, обнаруживаются соответствующие друг другу ключевые точки (рис. 15).

Шаг 9. На основании координат сопряжённых точек, отобранных по значению медианы параллаксов, вычисляется в пикселях величина сдвига одного изображения относительно другого, а затем и конечный размер кадров стереопары и будущего стереоизображения.

Шаг 10. Красная цветоделённая матрица левого кадра стереопары, а также зелёная и синяя цветоделённые матрицы правого кадра стереопары стыкуются вместе, и таким образом формируется изображение, предназначенное для просмотра в анаглифных красно-голубых очках (рис. 16). На представленном рисунке можно заметить, насколько точно выполнена коррекция рассогласования масштабов. Изображения стереопары совмещены по желаемому объекту (ваза), размеры параллаксов соответствуют требуемым величинам и равны нулю. Вертикальные параллаксы других объектов также равны нулю.

Время выполнения данного алгоритма для исходных кадров размером 2906×2174 пикселей и с коэффициентом рассогласования масштабов, равным 1,18, без



(a)

(б)

Рис. 14. Кадры стереопары после коррекции разномасштабности изображений предложенным алгоритмом: левый (а), правый (б)

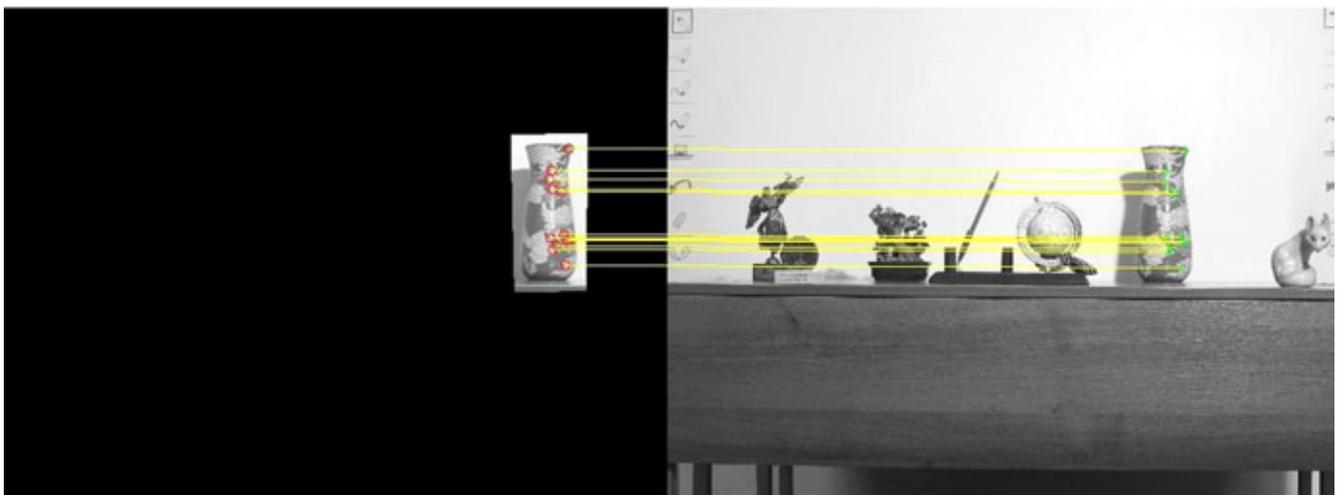
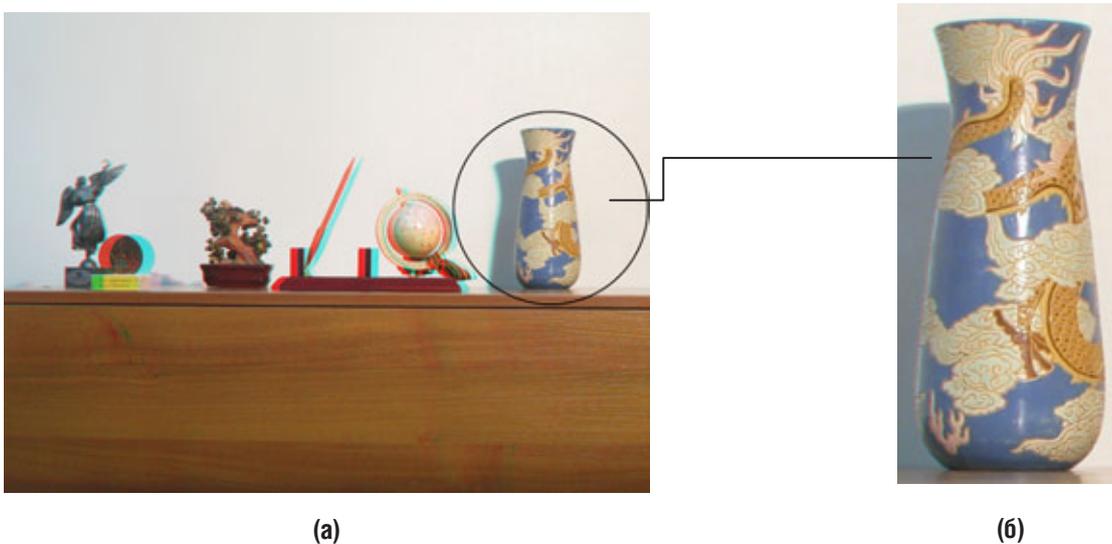


Рис. 15. Ключевые точки полутонового изображения выделенного объекта на левом кадре, сопряжённые с ключевыми точками полутонового изображения правого кадра стереопары, полученной после коррекции рассогласования масштабов



(a)

(б)

Рис. 16. Анаглифное изображение, сформированное при помощи разработанного алгоритма коррекции разномасштабности изображений и совмещения изображений стереопары по выбранному объекту (ваза) (а), и его фрагмент (б)

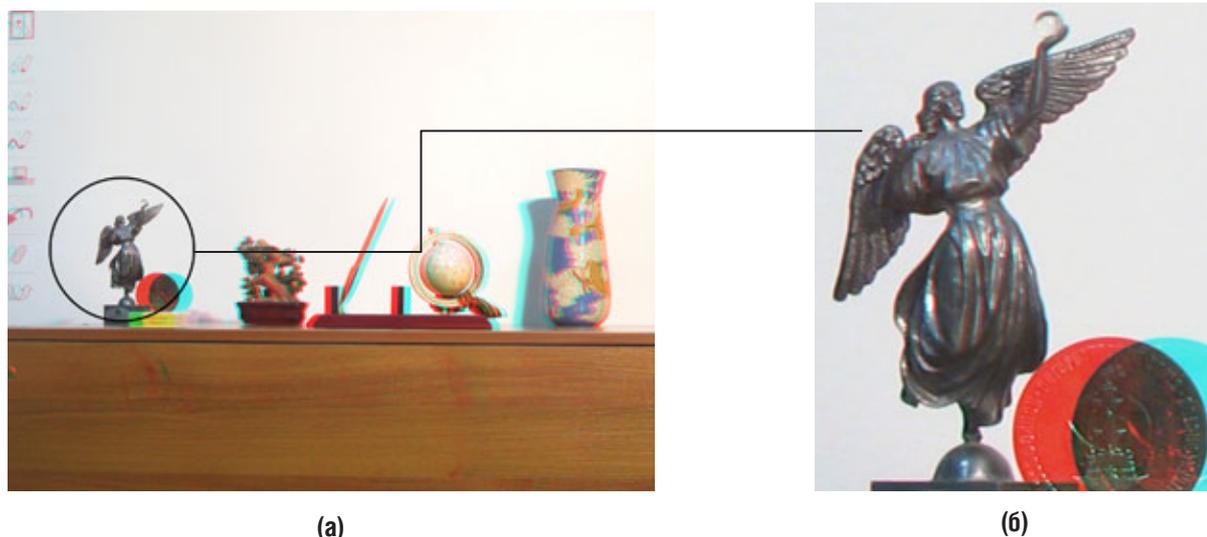


Рис. 17. Анаглифное изображение, сформированное при помощи разработанного алгоритма коррекции разномасштабности изображений и совмещения изображений стереопары по выбранному объекту (статуэтка ангела) (а), его фрагмент (б)

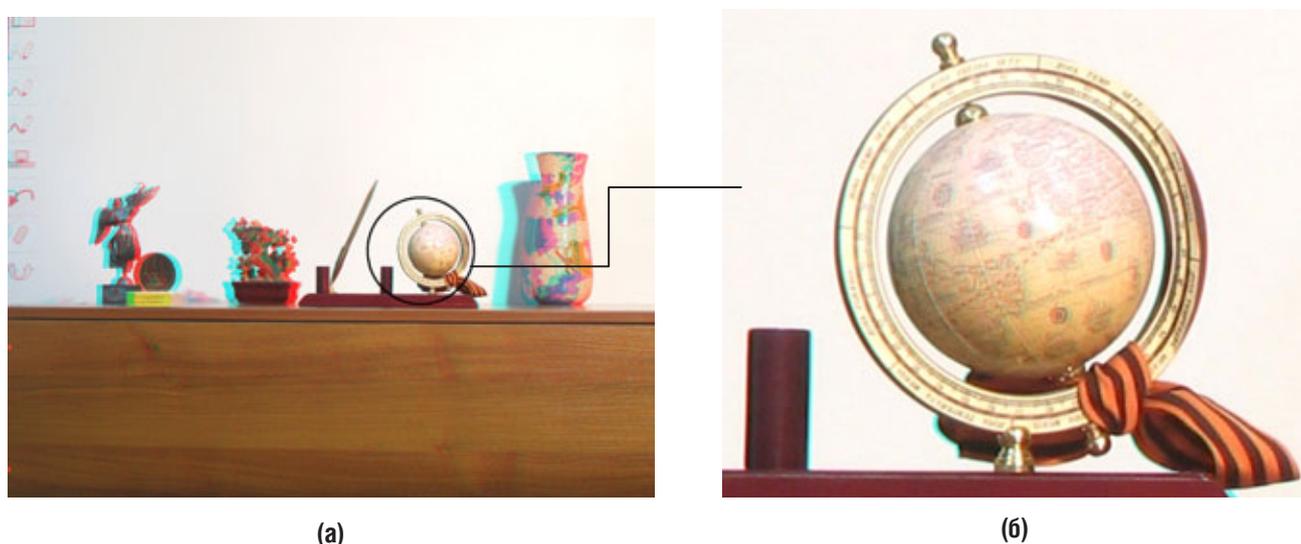


Рис. 18. Анаглифное изображение, сформированное при помощи разработанного алгоритма коррекции разномасштабности изображений и совмещения изображений стереопары по выбранному объекту (глобус) (а), и его фрагмент (б)

уменьшения разрешения и без учёта времени, затраченного на выделение нужного объекта, составило около 15 секунд. Из них большая часть времени была затрачена на увеличение изображений в соответствии с найденным значением коэффициента рассогласования масштабов (длительность операции по увеличению масштаба одного изображения составила 6 секунд). При этом время, затраченное только на контроль рассогласования масштабов изображений, составило не более 2 секунд. Измерения времени выполнения алгоритма проводились автоматически в программной среде Matlab. Параметры компьютера, который использовался при этом, следующие: операционная система – Windows 7, Корпорация Майкрософт (Microsoft Corp.), 2009. Процессор Intel (R) Core™ i3–2330M CPU @2.20 GHz 2.20 GHz, установленная память (ОЗУ) 3,00 ГБ. Тип системы: 64-разрядная операционная система.

На рис. 17, 18 показаны изображения, сформированные из исходных разномасштабных изображений (рис. 1) разработанным алгоритмом и совмещённые по другим объектам: по статуэтке ангела и по глобусу, соответственно.

Все операции предложенного алгоритма выполняются полностью автоматически, за исключением выделения объекта. Однако, в том случае, если совмещение изображений не требуется, а необходимы только контроль или коррекция разномасштабности, а также, если изображения стереопары не имеют наклона, выделять объект необязательно. При помощи детектора точечных особенностей соответствующие друг другу ключевые точки обнаружатся по всему полю левого и правого кадров, и на основании значений медианы параллаксов будет вычислено значение коэффициента рассогласования масштабов, согласно формулам (9) и (10).

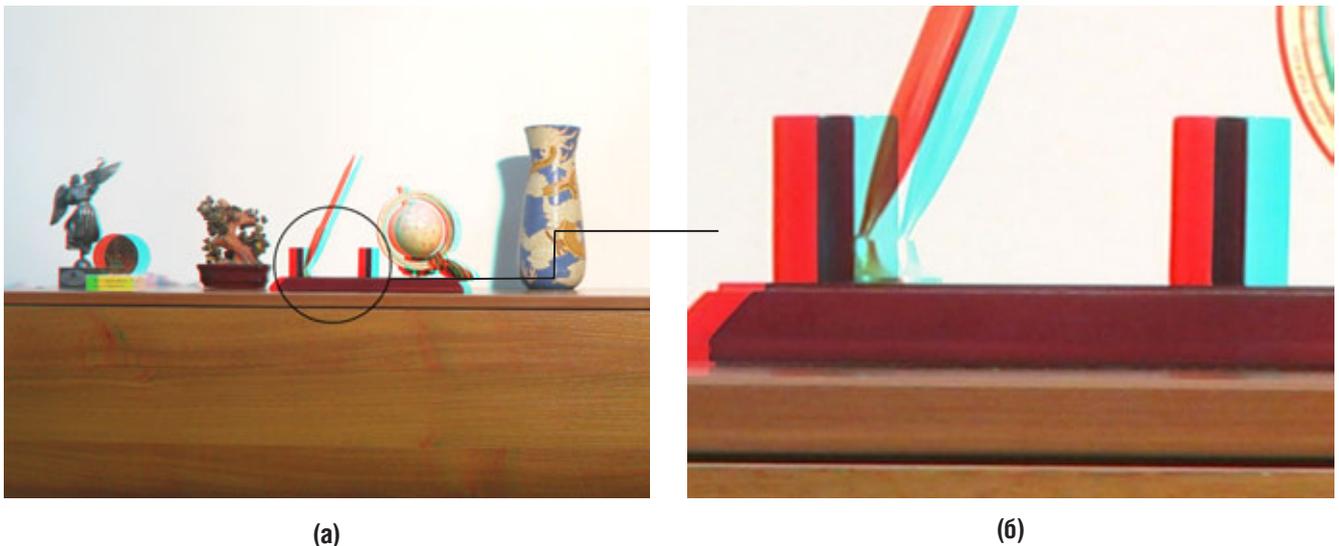


Рис. 19. Анаглифное изображение, сформированное при помощи разработанного алгоритма коррекции разномасштабности изображений и совмещения изображений стереопары по выбранному объекту (подставка для ручки) (а), и его фрагмент (б)

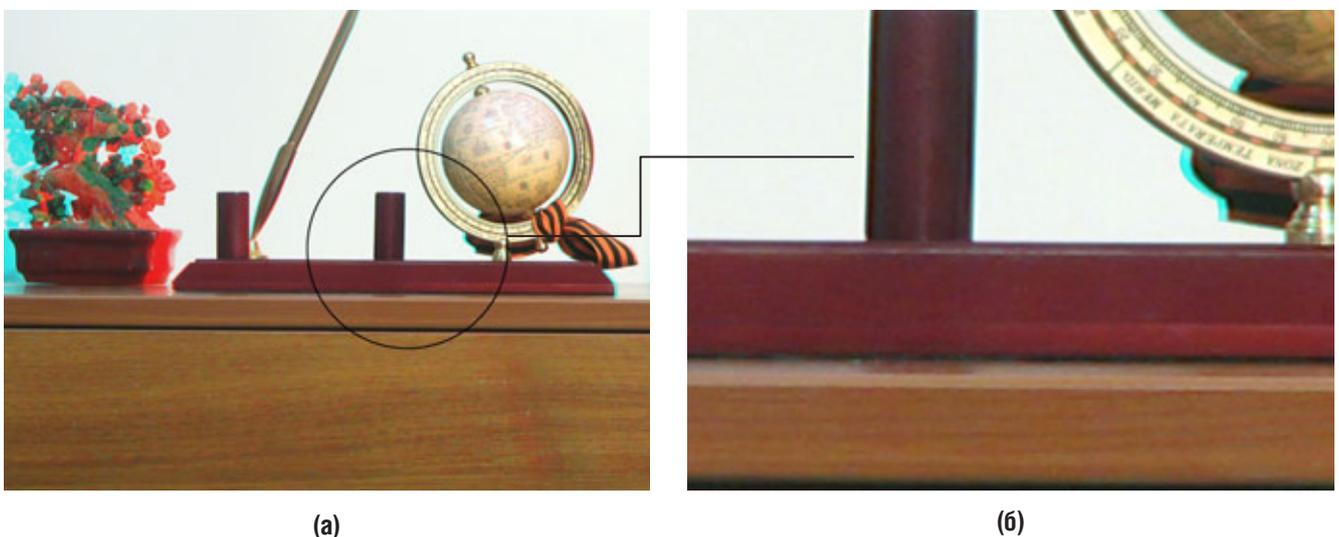


Рис. 20. Анаглифное изображение, сформированное при помощи разработанного алгоритма коррекции разномасштабности изображений и совмещения изображений стереопары по выбранному объекту (а), и его фрагмент (б)

Отличие в алгоритме формирования стереопары с коррекцией разномасштабности изображений для случая, когда с целью согласования масштабов уменьшается более крупное изображение, заключается только в шаге 6. При этом, в соответствии с полученной величиной коэффициента рассогласования масштабов (M), при помощи пространственного аффинного преобразования и билинейной интерполяции значений яркости пикселей, один кадр стереопары уменьшается относительно другого, и у данных кадров стереопары формируется одинаковый размер.

С целью определения значения коэффициента рассогласования масштабов, начиная с которого зрителям незаметна разномасштабность левого и правого кадров стереопары, нами был проведён эксперимент. Для этого группой студентов из 15 человек были рассмотрены анаглифные изображения совмещённых стереопар без

сепарации. При этом предполагалось, что если зритель не замечает наличие рассогласования масштабов изображений при рассмотрении не сепарированной стереопары, то просмотр стереопары с сепарированием не будет вызывать дискомфорт.

Используемые в эксперименте кадры были сняты крупным, средним и общим планами и демонстрировались с различной величиной коэффициента рассогласования масштабов (M). Значения коэффициентов M составляли следующие числа: 1, 1,001, 1,0015 и далее до 1,05. Наиболее заметна разномасштабность изображений была для стереопар, полученных съёмкой крупным планом. При значении $M = 1,03$ и более все участники эксперимента заметили наличие разномасштабности изображений, однако многие респонденты заметили рассогласование масштабов уже при $M = 1,02$. При значении M , меньшем 1,005, зрители перестали замечать

разномасштабность изображений. Таким образом, можно сделать вывод, что пороговое значение коэффициента рассогласования масштабов, начиная с которого разномасштабность изображений стереопары становится заметной для зрителей, сидящих в первом ряду зрительских мест, составляет 1,005.

При помощи представленного алгоритма коррекции разномасштабности изображений можно измерить коэффициент рассогласования масштабов для готовой стереопары и таким образом проверить, требуется ли коррекция разномасштабности кадров стереопары.

Так, для изображений, представленных на рис. 1, коэффициент рассогласования масштабов (M) составляет 1,18; после их преобразований в программе StereoPhotoMaker (рис. 3), коэффициент рассогласования масштабов стал равен 1,02; вертикальный параллакс при этом различен по полю кадра и составляет от 1 до 12 пикселей (т.е. от 0,046 до 0,55% от общего размера изображения по высоте).

Для изображений, представленных на рис. 4, а и 4, б, $M = 1,65$; после их преобразований в программе StereoPhotoMaker (рис. 4, в) коэффициент рассогласования масштабов равен 1,002; однако в полученных изображениях появился небольшой перекося одного изображения относительно другого, вследствие чего возник вертикальный параллакс от 2 до 6 пикселей (что состав-

ляет от 0,092 до 0,276% от общего размера изображения по высоте). Для изображений, представленных на рис. 5, а и 5, б, $M = 3,14$.

Совместим представленные на рис. 4, а, б, и 5, а, б изображения разработанным нами алгоритмом коррекции разномасштабности изображений. Результаты показаны на рис. 19 и 20, соответственно. Из представленных рисунков видно, насколько точно выполнены коррекция рассогласования масштабов и совмещение изображений стереопары по выбранному объекту.

Заключение

Предложенный алгоритм коррекции рассогласования масштабов изображений стереопары позволяет автоматизировать процесс контроля и коррекции разномасштабности изображений, выполняя данные операции с высокой точностью. Также при помощи разработанного алгоритма можно совместить изображения стереопары, обеспечив выделенному объекту нулевой горизонтальный параллакс.

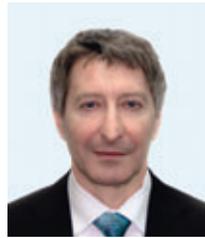
Данный алгоритм может быть полезен не только в области стереокинематографа или при создании стереофотографий, но практически во всех областях, где требуется контроль и коррекция рассогласования масштабов, и где применяется цифровая обработка изображений. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Газеева И. В., Тихомирова Г. В., Чафонова В. Г. Алгоритмы цифровой конвергенции изображений стереопары//МТК № 31, 2014.
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. Прэйтт У. Цифровая обработка изображений/Пер. с англ. – М.: Мир, 1982.
7. Раев О. Н. Стереотехнологии в кинематографе и в кинообразовании. К итогам III Международного 3D-стерео кинофестиваля 2012 года//МТК № 27, 2013.
8. Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004.
9. Цифровая обработка 2D- и 3D-изображений: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки 230400 «Информационные системы и технологии»/Красильников Н. Н. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2011.
10. Чемерис Д. С., Бурдинский И. Н. Исследование методов определения геометрического рассогласования двух изображений для решения задачи оптического наведения и стыковки подводного робота//Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB: материалы V Международной научной конференции. – Харьков: ФЛП Шейнина Е. В., 2011.
11. Чертихин А. А., Винокур А. И. Использование алгоритма поиска ключевых точек в информационной системе, обеспечивающей стабильность кадра при оцифровке архивных киноматериалов//МТК № 26, 2012.
12. Яне Б. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2007.
13. Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Van Gool L. SURF: Speeded Up Robust Features//Computer Vision and Image Understanding. 2008. Vol. 110. № 3.
14. Reddy B. S., Chatterji B. N. An fft-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration//IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996.
15. Rosten E., Porter R., Drummond T. Faster and better: A machine learning approach to corner detection//IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2010. Vol. 32. № 1.
16. <http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/image-interpolation.htm>



УФ-ОТВЕРЖДАЕМЫЙ ПОЛИМЕРНЫЙ МАТЕРИАЛ для создания реплик дифракционных оптических элементов



О.Э. Бабкин, д.т.н., А.В. Жданова, аспирант,
В.В. Ильина, к.т.н., В.Н. Михайлов, к.ф.-м.н., СПбГУКиТ

Аннотация

В статье приведены результаты исследований по созданию нового фотополимерного материала, предназначенного для процесса копирования дифракционных оптических элементов.

Ключевые слова: тиражирование голограмм, фотополимерные композиции.

UV-CURABLE POLYMER MATERIAL TO PRODUCE REPLICAS OF DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS

O. Babkin, A. Zhdanova, V. Ilina, V. Mikhailov

Abstract

The article contains the results of research in the creation of a new photopolymer material for copying process of diffractive optical elements.

Keywords: holograms replicating, photopolymer composition.

■ В настоящее время дифракционные оптические элементы (ДОЭ) имеют широкий диапазон применения: делители и фокусаторы лазерного излучения, дифракционные элементы в спектральных приборах и объективах, элементы, корректирующие искажение изображений в оптических системах, и т.д. Одним из ярких примеров использования ДОЭ в приборостроении является применение их в качестве составных элементов фотографического объектива производства фирмы Canon. Идея использовать в объективах дифракционные оптические элементы возникла ещё в конце 1990-х годов с целью снижения хроматических aberrаций. Так появились на свет объективы типа EF с линзами DO (рис. 1, 2), которые значительно короче и легче обычных объективов с рефракционными элементами. Например, EF 400 mm f/4 DO IS USM на 27% меньше и на 31% лег-

че, чем был бы традиционный объектив f/4 с фокусным расстоянием 400 mm [1, 2, 3].

Достаточно широко на практике применяются голографические дифракционные элементы – оптические устройства, изготавливаемые с применением методов голографии.



Рис. 1. Объектив Canon EF 400mm f/4 DO IS USM [2]

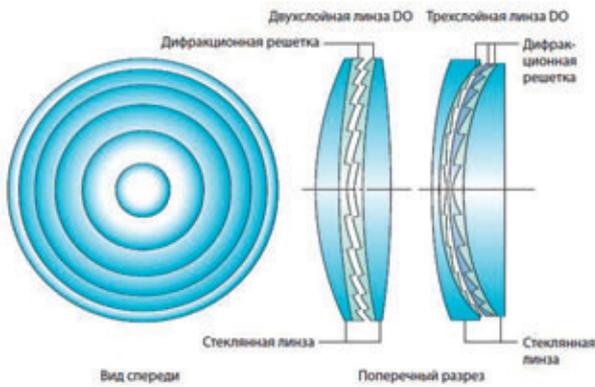


Рис. 2. Конструкция линзы DO [3]



Рис. 3. Голограммная дифракционная решётка [4]



Рис. 4. Блок-схема изготовления голограммной дифракционной решётки



Рис. 5. Важнейшие характеристики основных классов олигомеров [15]

Наиболее известное применение связано с изготовлением голограммных дифракционных решёток (рис. 3) [1].

Голограммные дифракционные решётки сравнительно просты в изготовлении (рис. 4) и не имеют дефектов, связанных с технологией изготовления дифракционных решёток методом нарезания штрихов, а именно, уменьшается светорассеяние, исключается появление ложных линий в спектре, увеличивается разрешение. Кроме этого, голографический метод записи позволяет изготавливать решётки с заданным угловым распределением отражённого/проходящего излучения. Это свойство голограммных решёток используется, в частности, при изготовлении экранов для голографического кинематографа, разработанных в НИКФИ (Москва) под руководством В.Г. Комара [5, 6]. Однако, для записи голограммной решётки большого формата (в том числе, экрана для голографического кинематографа) требуются высококогерентные источники излучения, интерферометрическое оборудование, а также дорогостоящие материалы, что ограничивает массовое производство таких дифракционных решёток. В связи с этим, представляется целесообразным разработать технологию тиражирования дифракционных решёток с мастер-оригинала методом снятия реплик.

Для получения дифракционных решёток голографическим способом могут использоваться светочувствительные материалы, способные после регистрации интерференционной структуры и последующей обработки создавать качественное рельефное изображение.

В ряду материалов, используемых в голографии, для этих целей подходят, например, органические и неорганические фоторезисты, используемые также в фотолитографии и микроэлектронике. Основным преимуществом фоторезистов, в отличие от других сред (например, содержащих желатин), является их безупречность, что чрезвычайно важно и при голографической записи, и при процессе тиражирования. При освещении фоторезиста актиничным излучением (т.е. излучением, соответствующим спектральной чувствительности данного материала), в нём происходят фотохимические реакции, приводящие либо к увеличению растворимости (позитивные фоторезисты), либо уменьшению растворимости (негативные фоторезисты) в облучённых областях материала, что, в итоге, приводит к появлению поверхностного рельефа, отображающего записываемую информацию. Позитивные фоторезисты чаще всего синтезируются на основе нафтохинондиазидов, в негативных фоторезистах в качестве основной компоненты часто применяется поливинилциннамат [7]. Полученная голографическая рельефная структура в дальнейшем может быть скопирована методом снятия реплик [8].

Табл. 1. Составы фотополимерных композиций

№ ФПК	Олигомер	Мономер	Вязкость композиций, мПа*с
1	Эпоксиакрилат (f = 2; ММ = 550 г/моль)	Изоборнил акрилат (f = 1; ММ = 208 г/моль)	220
2		Дипропиленгликольдиакрилат (f = 2; ММ = 250 г/моль)	80
3		Этоксированный триметилпропантриакрилат (f = 3; ММ = 430 г/моль)	85
4	Полиэфир акрилат (f = 2,6; ММ = 1100 г/моль)	Изоборнил акрилат (f = 1; ММ = 208 г/моль)	240
5		Дипропиленгликольдиакрилат (f = 2; ММ = 250 г/моль)	920
6		Этоксированный триметилпропантриакрилат (f = 3; ММ = 430 г/моль)	330
7	Ароматический уретан акрилат в ГДДА (f = 3; ММ = 2000 г/моль)	Изоборнил акрилат (f = 1; ММ = 208 г/моль)	260
8		Дипропиленгликольдиакрилат (f = 2; ММ = 250 г/моль)	250
9		Этоксированный триметилпропантриакрилат (f = 3; ММ = 430 г/моль)	1000

Перспективными материалами для изготовления реплик дифракционных решёток являются фотополимерные материалы, обладающие большей чувствительностью (10^{-3} – 10^{-2} Дж/см²) в сравнении с фоторезистами высокой разрешающей способности (до 5000 мм⁻¹), термостойкостью в широком интервале температур и не требующие «мокрой» обработки [10].

При всём многообразии фотополимерных материалов, имеющих широчайший спектр применения в настоящее время – от медицины до строительства, полиграфии, 3D дизайна и далее, все они имеют базовое строение: полимеризующийся олигомер (плёнкообразователь) (рис. 5), полимеризующийся мономер (активный разбавитель), фотоинициатор и функциональные добавки, определяющие специфику готового материала. Безусловно, композиция может иметь в своём составе смесь добавок, либо смесь инициаторов, либо представлять собой олигомерно-мономерную смесь без добавок, которые будут вводиться непосредственно перед применением материала, но большинство содержат базовые компоненты, каждый из которых имеет свою узкую функционализацию. Например, тип плёнкообразователя определяет физико-механические свойства получаемого материала, а также реакционную способность композиции; активный разбавитель влияет на вязкость системы, определяя её растекаемость в слое; фотоинициатор определяет реакционную способность материала и необходимую дозу облучения; добавки (аддитивы), как уже говорилось, определяют специфику материала [9] – обеспечивают

блеск, матовость, цветность материала (если это требуется) [11], бактерицидную устойчивость материала (для медицинских целей) [12], в качестве добавок, препятствующих коррозии (металла) [13], в качестве УФ-абсорберов [14] и др.

Для того чтобы снять реплику с ДОО, материал должен обладать высокой разрешающей способностью (т.е. минимальным воспроизводимым размером штриха), низкой вязкостью (< 300 мПа*с), малой усадкой (≤ 5 масс.%), эластичностью, стойкостью к термическим и механическим воздействиям, и т.д.

Результаты эксперимента

Исследовалась возможность создания фотополимерного материала для тиражирования голографических дифракционных решёток, отвечающего следующим требованиям:

1. время отверждения, не более 180 с;
2. отсутствие цветности (желтизны) при копировании на прозрачную подложку;
3. отсутствие «залипания» композиции при копировании глубоких рельефов.

В качестве эталона сравнения взяли композицию ОКМ-2, широко используемую в настоящее время для снятия реплик микрорельефов ДОО, состав которой указан ниже:

Бис-(метакрилоксиэтиленкарбонат)-диэтиленгликоля по ТУ 113-03-22-65-79 – 100 масс. ч.

Инициатором для ОКМ-2 в данной системе служит:

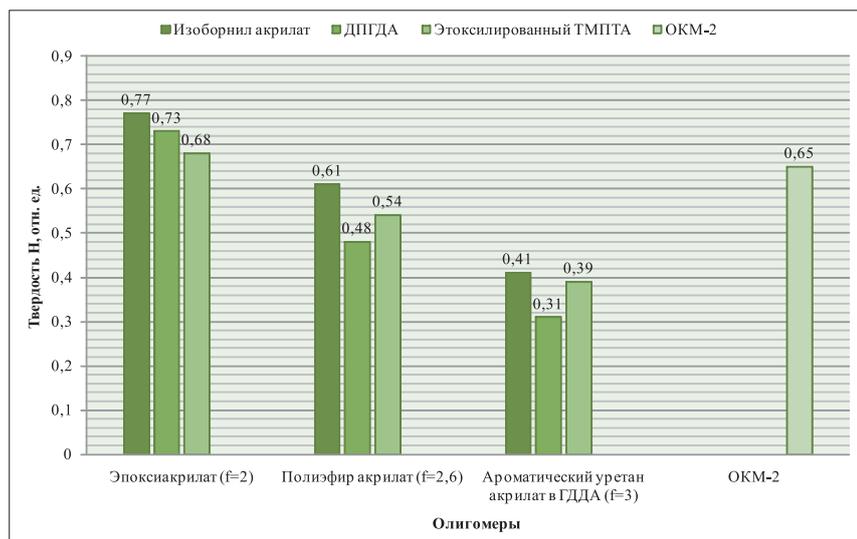


Рис. 6. Значения твёрдости испытуемых композиций

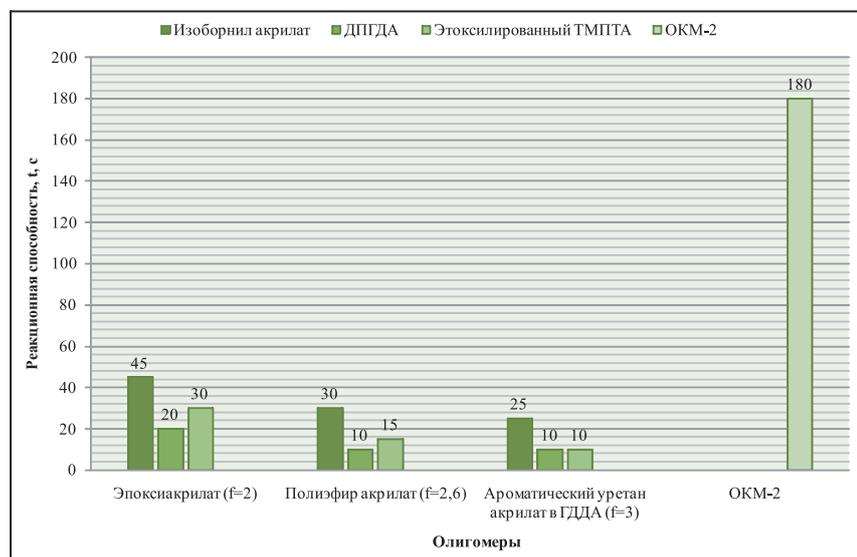


Рис. 7. Значения реакционной способности для испытуемых композиций

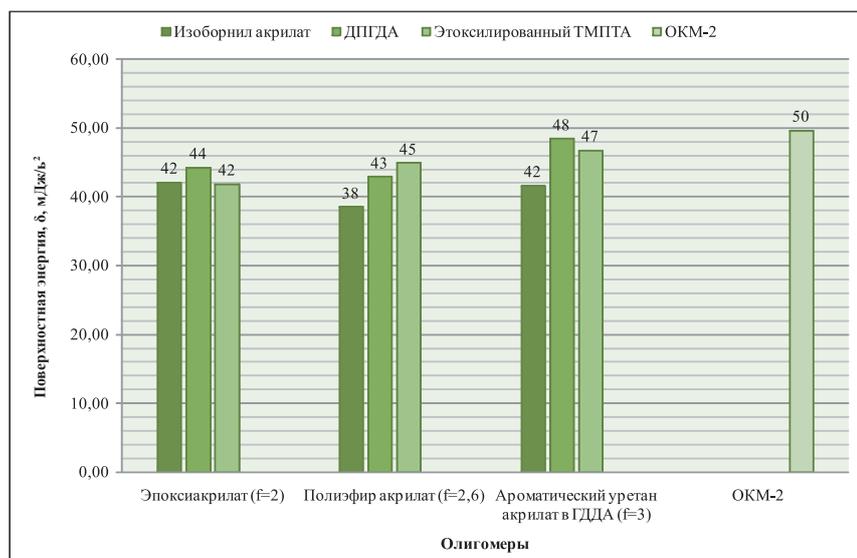


Рис. 8. Значения поверхностной энергии для испытуемых композиций

2,2-диметокси-2-фенилацетофенон (Acros 18784) CAS 24650-42-8 – 5 масс. ч.

Составы исследованных композиций приведены в таблице 1. Олигомеры и мономеры вводились в композицию в соотношении 1:1. Также в композиции вводилась смесь фотоинициаторов 2,4,6-триметилбензоилдифенилфосфиноксид и 1-гидроксициклооксил-фенил-кетон в соотношении 1:4.

Композиции замешивались в бисерной мельнице SB 401/1 в условиях естественного освещения.

Методика проведения испытаний полученных композиций включала в себя:

1. определение динамической вязкости композиции по ГОСТ 1929-87 на цифровом ротационном вискозиметре BROOKFIELD DV-E (ISO 9001:2000), обеспечивающем воспроизводимость результатов измерений 0,2% (результаты измерений приведены в табл. 1);
2. определение реакционной способности и твёрдости по ИСО 1522-73 на маятниковом приборе ТМЛ-2124 (рис. 6, 7);
3. определение поверхностной энергии методом расчёта по уравнению Оуэнса-Вендта-Кабли по значениям краевого угла смачивания (рис. 8).

При стационарных условиях экспонирования материалов источником УФ-излучения на установке ОРК-21М1 с ртутной лампой ДРТ-400 (по ГОСТ 64-1-1618-77) время полного отверждения (реакционная способность) эталонной композиции составило 180 с. Любая из исследуемых композиций показала значительно большую реакционную способность в сравнении с эталонным образцом (рис. 7), при этом в ряду исследуемых композиций наименьшее время отверждения необходимо композициям № 5, 8 и 9, на основе полиэфир акрилата (10 с) и ароматического уретан акрилата в гександиолдиакрилате (10 с), имеющего наибольшую функциональность среди используемых олигомеров (f=3). Однако при этом, отверждённый слой композиции № 8 и 9 имеет наихудшие значения твёрдости среди исследуемых (0,31 и

0,39 отн. ед.), т.е. в 2 раза хуже эталонной и в 2,4 раза хуже композиции № 1 на основе эпоксиакрилата (рис. 6). Также следует учитывать, что в процессе копирования важен не столько абсолютный показатель твёрдости слоя, сколько взаимосвязанный с ним показатель эластичности: при снятии копии на гибкую подложку (полипропилен, лавсан) необходимо избежать растрескивания слоя в процессе копирования, для этого готовая плёнка должна быть эластичной, не хрупкой, не трескаться и не крошиться. Эпоксиакрилатная композиция, несмотря на высокую реакционную способность и высокие показатели твёрдости готовых плёнок, не подошла для процесса копирования голографических дифракционных решёток. Такой композицией трудно снять реплику с мастер-оригинала без повреждений.

Другим важнейшим показателем, характеризующим адекватность материала процессу тиражирования, является значение поверхностной энергии плёнки. Для эффективного процесса копирования, когда копия полностью остаётся на полимерной подложке и не налипает на мастер-оригинал (в нашем случае, халькогенидное стекло), требуется низкая поверхностная энергия отверждённой плёнки, близкая к поверхностной энергии мастер-оригинала. Зная значения поверхностной энергии подложки, отверждённых композиций, мастер-оригинала оптического элемента (халькогенидное стекло, алюминий, золото), можно спрогнозировать адгезию материала, контролируя тем самым процесс копирования в

каждом конкретном случае, когда под материал копируемого элемента можно подобрать композицию определённого состава с требуемыми свойствами.

Реплики снимали с голограммной дифракционной решётки на халькогенидном стекле с частотой 1000 л/мм и глубиной рельефа порядка 270 нм, имеющей поверхностную энергию ≈ 34 мДж/м². Следовательно, для полной передачи глубины рельефа при копировании, без залипания, должна использоваться композиция со значением поверхностной энергии, близким к 34 мДж/м². Из исследуемых композиций этому требованию наиболее полно отвечает композиция № 4 на основе полиэфир акрилата. При рассмотрении оригинала и реплик в микроскопе МИИ-4 было замечено, что потери глубины рельефа незаметны.

Заключение

По итогам проделанной работы можно сказать, что наиболее подходящим по ряду свойств фотополимерным материалом для снятия реплик с голограммной дифракционной решётки, записанной на халькогенидное стекло, является композиция на основе полиэфир акрилата с изоборнил акрилатом. Именно этот материал сочетает в себе оптимальные значения по твёрдости/эластичности, реакционной способности, а также имеет значение поверхностной энергии, близкое к значению поверхностной энергии халькогенидного стекла. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Diffraction gratings and applications: E.G. Loewen, E. Popov/ Marcel Dekker Inc., 1997. – 601 с.
2. URL: http://www.canon.ru/For_Home/Product_Finder/Cameras/EF_Lenses/DO_Lenses.aspx (дата обращения: 06.09.2014).
3. URL: <http://www.shtapov.ru/fotomekhanika/9/89/> (дата обращения: 06.09.2014).
4. URL: <http://holograte.com/> (дата обращения: 06.09.2014).
5. Комар В.Г. Возможности создания кинотеатральной системы голографического кинематографа и создания многоакурсной системы стереокино // МТК – 2009, №14. – С. 13–14.
6. Комар В.Г., Серов О.Б. Изобразительная голография и голографический кинематограф. М., Искусство, 1987.
7. Оптическая голография: 2 тома, Т.2; пер. с англ. / под ред. Колфилда – М: Мир, 1982. – 735 с.
8. Бобров С.Т., Ляховецкая Т.А., Петрашова О.Н., Сафронов В.М., Туркевич Ю.Г. Методика и результаты исследований полимерных реплик дифракционных оптических элементов // Компьютерная оптика. – 1991. – вып. 9. – С. 93–97.
9. Бабкин О.Э. Полимерные покрытия УФ-отверждения: Учебное пособие – СПб.: изд-во СПбГУКиТ, 2012. – 47 с.
10. Гуревич С.Б., Константинов В.Б., Соколов В.К. и др. Передача и обработка информации голографическими методами; под ред. С.Б. Гуревича – М: Советское радио, 1978. – 304 с.
11. Максимова М.А., Бабкин О.Э., Бапкина Л.А. Влияние размеров и формы частиц пигментов на реактивность УФ-композиций // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2013. – № 4. – С. 44–46.
12. Коржииков В.А., Влах Е.Г., Тенникова Т.Б. Полимеры в ортопедической хирургии и тканевой инженерии: от конструкционных материалов к «умной» биофункционализации поверхности // Высокомолекулярные соединения. Сер. А, Сер. Б и Сер. С. – 2012. – Т.54, № 8 – С. 1203–1221.
13. Бабкин О.Э., Бапкина Л.А., Ильина В.В. Композиции УФ-отверждения для антикоррозионной защиты // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2014. – № 3. – С.70–72.
14. Бабкин О.Э., Максимова М.А., Бапкина Л.А., Цветкова Е.К., Ястребов С.Г. УФ-технология получения полимерных покрытий для защиты от УФ-излучения // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2013. – № 7. – С. 28–31.
15. Бабкин О.Э., Бапкина Л.А., Ильина В.В. УФ-отверждаемые антикоррозионные покрытия // Мир гальваники. – 2014. – № 2 – С. 42–45.



В КАДРЕ – ПЕРВАЯ МИРОВАЯ



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

(Продолжение. Начало в МТК № 32)

■ Эйкли создавал свою камеру для мирных целей – съёмки живой природы. Изобретатель с помощью своей камеры произвёл киносъёмки обезьян в их природном биотопе. С началом Первой мировой войны кинокамеры «Akeley» стали использовать для плавной съёмки быстро движущихся объектов. Например, французские кинооператоры снимали ими взлетающие самолёты. Камера была запатентована в 1916 году. Было выпущено более 400 кинокамер.

В августе 1914 года министр финансов Великобритании Дэвид Ллойд-Джордж (David Lloyd George), в противовес немецкому бюро пропаганды, создал британское секретное военное бюро пропаганды (British War Propaganda Bureau) в Веллингтон Хаусе (Wellington House) – лондонской штаб-квартире Национальной комиссии по страхованию (National Insurance Commission). Руководитель бюро – писатель Чарльз Мастерман (Charles Masterman) начал пропагандистскую кампанию 2 сентября 1914 года, пригласив 25 крупнейших британских писателей в Веллингтон Хауз для выработки лучших методов пропагандистской работы в интересах Великобритании во время войны. Среди них были Уильям Арчер (William Archer), Артур Конан Дойль (Arthur Conan Doyle), Арнольд Беннетт (Arnold Bennett), Джон Мейсфилд (John Masefield), Г. К. Честертон (Gilbert Keith Chesterton), Джон Голсуорси (John Galsworthy), Редьярд Киплинг (Rudyard Kipling), Герберт Уэллс (Herbert George Wells) и другие.

В начале 1915 года один из создателей первой в мире цветной системы кинематографа «Кинемаколор» (Kinemascope) Чарльз Урбан (Charles Urban) получил от секретного военного Бюро заказ на производство

первого пропагандистского фильма «Britain Prepared» (Британия подготовлена). Основная задача фильма, рассчитанного на прокат в странах-союзницах, – рассказ о крупномасштабных военных приготовлениях Великобритании. Фильм состоял из 19 эпизодов. Четыре из них были цветные, снятые по системе «Кинемаколор»:

12 сюжет. «The Iron Grip» (Железная хватка) – в сюжете показаны военные корабли Британского флота: корабль Его Величества «Железный герцог» (HMS Iron Duke) – британский линейный корабль, головной в серии линкоров типа «Iron Duke» (фото 11); корабль Его Величества «Эджинкорт» (HMS Agincourt) – британский дредноут; корабли Его Величества «Зеландия» (HMS Zealand) и «Коммонвелф» (HMS Commonwealth) – эскадренные броненосцы; корабль-госпиталь «Гарт Каstel» (HM Hospital Ship Garth Castle);



Фото 11. Корабль Его Величества «Железный герцог» (HMS Iron Duke), сюжет 12, фильм «Britain prepared» (Британия подготовлена)



Фото 12. Премьерная афиша кинофильма «Britain Prepared» (Британия подготовлена) (1915)

13 сюжет. «A Battle Squadron at Sea» (Сражение эскадры в море) – в сюжете показан проход линкоров и крейсеров;

16 сюжет. «Life on H.M.S. «Queen Elizabeth»» (Жизнь на корабле Его Величества «Королева Елизавета»);

19 сюжет. «Watch-dogs of Empire in Action» (Сторожевые псы Империи в действии) – в сюжете показаны корабли Его Величества «Африка» (H.M.S. «Africa») и «Британия» (H.M.S. «Britannia»). Стрельба на 15-дюймовые пушки корабля Его Величества «Королева Елизавета» (H.M.S. «Queen Elizabeth»).

Премьера состоялась в лондонском театре «Empire Theatre» 29 декабря 1915 года (фото 12). Фильм начал демонстрироваться во многих странах мира. Чарльзу Урбану удалось сломать сопротивление американских кинопрокатчиков и выпустить этот фильм на экраны США.

В течение Первой мировой войны английскими кинематографистами было снято более двухсот фильмов и более ста пятидесяти киножурналов, но все они были чёрно-белые.

Интерес кинозрителей к документальным материалам с полей сражений мировой войны и нехватка последних иногда «компенсировались» перемонтажом довоенных киноматериалов, снятых в войсках, и выпуском их под новым названием как современная



Фото 13. Кадр из кинофильма «The Durbar At Delhi» (1911), перемонтированного в 1914 году и выпущенного по системе «Kinemasolor» на экраны России как цветная кинохроника Первой мировой войны под названием «Индо-британские войска на Западном фронте»

кинохроника. К такой фальсификации относятся сохранившиеся в Российском государственном архиве кинофотодокументов под учётным номером «12496 А, Б» и названием «Индо-Британские войска на Западном фронте» цветоделённые фрагменты, описанные в каталоге «Kinemasolor» в разделе «The Royal Review of 50,000 Troops» (Королевский смотр 50000 войска). Съёмка была проведена 14 декабря 1911 года во время смотра войск в Дели (фото 13). Эти вырезанные и перемонтированные кадры из полнометражного цветного фильма «The Durbar At Delhi» (Торжества в Дели) под видом актуальной кинохроники выпустила в России фирма Пате в 1914 году под нелепым названием «Индийские войска всех колоний, сражающиеся теперь в Европе с Тевтонами». Несоответствие названия содержанию кадров зритель обнаруживает не сразу, хотя перед ним проходят эпизоды грандиозного военного парада, и отнюдь не в Европе. Почти натуральное цветное изображение, огромное количество войск, динамичное действие и отсутствие какой-либо географической привязки заставляют зрителей поверить в эту историческую фальсификацию.

К фальсификации исторических кино- и фотоматериалов прибегают и сегодня, используя цифровые технологии. Известны случаи колоризации кинохроники Первой мировой войны и демонстрации «новодела» без информирования современного зрителя, что это не цветной кинодокумент эпохи, а цифровая подделка.

Повальное увлечение 3D, или как наиболее верно это называется, стереоскопическим изображением порождает на свет подделки фотодокументов в формате 3D. Хотя в таких подделках нет никакой необходимости – в архивах и частных коллекциях хранится множество подлинных стереоскопических снимков периода Первой мировой войны. Это и стереосъёмки боевых действий, и мирной жизни тыла.



Фото 14. Стерефотокамера «Verascope» (1895)



Фото 15. Порт-Артур, 1905 год



Фото 16. Первая мировая война. Фотографы 10-й Стрелковой сибирской дивизии (5-й армейский корпус) Российской империи, 1915–1916



Фото 17. Стерефотокамера «Stereo Jumelle Camera»



Фото 18. Стерефотокамера «No. 2 Stereo Brownie»

Одной из первых, если не первой, «репортёрской» стереокамерой стал фотоаппарат «Verascope», созданный французским пионером стереофотографии Жюлем Ричардом (Jules Richard) в 1895 году (фото 14). В отличие от своих пластиночных собратьев, эта камера отличалась малыми размерами, небольшим весом и возможностью оперативной смены десяти фотопластинок, которые находились в специальном магазине. Отснятая фотопластинка перемещалась за экспонированные путём выдвигания-затягивания рукоятки на магазине. Стерефотокамеры «Verascope» выпускались для двух форматов стереопар: 45x107 мм и 60x130 мм.

Вероятнее всего, первые стереоскопические снимки на военную тему появились в период Русско-японской войны 1904–1905 годов, как этот (фото 15) снимок, сделанный в Порт-Артуре в 1905 году.

На фото 16 хорошо видно, что второй и третий справа фотографы держат в руках стереоскопические фотоаппараты. В конце XIX–начале XX века многие фотофирмы освоили массовый выпуск фотоаппаратуры для съёмки стереопар. У второго справа фотографа стереокамера «Stereo Jumelle Camera» французской фирмы Гомон (Gaumont) – фото 17. Два объектива Tessar-Zeiss с фокусным расстоянием 107 мм и светосилой 6,3 лм обеспечивали получение высококачественной стереопары на стеклянной пластинке или листовой плёнке размером 9x18 см. Высокие технические характеристики этого фо-



Фото 19. Первая мировая война. Подводные лодки



Фото 20. Первая мировая война. На военно-морской верфи



Фото 21. Первая мировая. Апофеоз войны

тоаппарата были отмечены Гран-При на Парижской Международной выставке в 1900 году.

В первый год XX века фирма Eastman Kodak Company начала выпуск широкоформатной катушечной неперфорированной плёнки, получившей в 1908 году известное всем фотографам название «Тип 120». Плёнка предназначалась для использования в лёгкой и компактной стереокамере «No. 2 Stereo Brownie», выпуск которой начала фирма. Плёнка позволяла получать шесть стереопар размером 6x6 см каждого ракурса. Эта модель камеры выпускалась серийно до 1910 года, и было выпущено около 4000 камер (фото 18).

Американская компания «Blair Camera Company» в период с 1904 по 1907 год выпускала стереофотоаппарат «Stereo Hawkeye Model No. 2» для плёнки «Тип 120». Вскоре на выпуск плёночных стереокамер перешли и европейские компании. Хотя по-прежнему ряд из них продолжал выпуск камер для стеклянных фотопластинок. Использование катушечных плёнок намного облегчало работу фоторепортёров, позволяло оперативно делать несколько кадров. И естественно, что эта плёнка нашла широкое применение для получения стереопар. А сами камеры нашли своё предпочтение у репортёров, как в мирное время, так и в годы Первой мировой войны (фото 19, 20, 21).

Многие изобретения и разработки в области фотографии и кинематографии, сделанные и применявшиеся в годы Первой мировой войны, нашли своё продолжение и развитие в мирное время. А многие фронтовые фотографии и кинооператоры, начавшие свой творческий путь на полях сражений, вошли в историю мирового фото- и киноискусства как выдающиеся мастера мирной профессии, мастера светописа, дарящие зрителям радость высокого искусства. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Киномузей ГАХН. Из архива Г.М. Болтянского / Публикатор С. Ишевская // Киноведческие записки. – 2007. – № 84. – С. 26–42.
2. Болтянский Г.М. Историческая кино-документация и кино-музей. М. Кино. – 1922. – № 1. – С. 23–24.
3. Малышева Г.Е. К истории кинематографической деятельности Скобелевского комитета. 1913–1914 гг. Российский историко-архивоведческий журнал «Вестник Архивиста», 20 марта 2014.
4. Ханжонков А.А. Первые годы русской кинематографии. М. – Л., 1937.
5. Ron van Doppen, Cooper C. Graham. «Shooting the Great War: Albert Dawson and the American Correspondent Film Company, 1914–1918». Publisher: CreateSpace Independent Publishing Platform; 1 edition (October 21, 2013).
6. Akeley, Delia J. Jungle Portraits. – Brownell Press, 1930.
7. Научно-технический журнал «Мир техники кино», № 10, 2009, с. 23–26; № 15, 2010, с. 48–55.