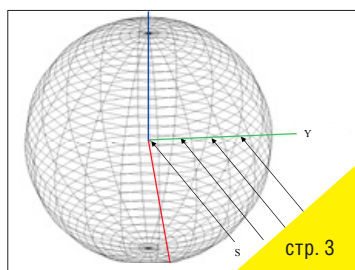


2018-1 (12) СОДЕРЖАНИЕ



стр. 3

Теория

Ю. Индлин, 7654081@mail.ru
Верны ли формулы для расчёта времени реверберации? 3

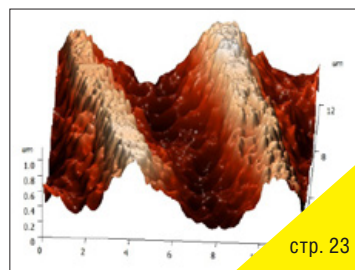


стр. 12

Технологии

С.В. Лаврушкин, Д.С. Ватолин, dmitriy@graphics.cs.msu.ru
Разработка метода поиска перепутанных ракурсов в стереофильмах 12

И.А. Молодецких, ivan.molodetskikh@graphics.cs.msu.ru,
Д.С. Ватолин, dmitriy@graphics.cs.msu.ru
Алгоритм автоматического построения карт перемонтажа разных версий фильма 18



стр. 23

А.Ф. Смык, smykholography@gmail.com, А.В. Шурыгин
Асимметричные профили в поверхностно-рельефных голограммах 23

Стандартизация

Л.С. Тихонова, at_kte@mail.ru
Способ измерения частотно-зависимой амплитудной нелинейности усилителей сигналов звуковой частоты. Часть 2: Описание способа измерения динамических интермодуляционных искажений 31



стр. 36

Страницы истории кино

Н. Майоров, henrymay@mail.ru
Самые первые в истории развития мирового кинематографа (продолжение) 36

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: Филиал «НИКФИ» АО «ТПО «КиноСтудия им. М. Горького», ООО «ИПП «КУНА»
Выпуск издания осуществлён при финансовой поддержке: 1. Федерального агентства по печати и массовым коммуникациям 2. ЧОУ ДПО «Высшая школа киноинженеров».

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

Члены редакции:
Овечкис Ю.Н., д.т.н., Московский Политехнический Университет, РФ
Вишняков Г.Н., проф., д.т.н., ФГУП «ВНИИОФИ», г. Москва, РФ
Тихомирова Г.В., проф., д.т.н., СПбГИКит, г. Санкт-Петербург, РФ
Сакварелидзе М.А., д.х.н., ВГИК, г. Москва, РФ
Винокур А.И., д.т.н., Московский Политехнический Университет, РФ
Перегудов А.Ф., к.т.н., ВГТРК, г. Санкт-Петербург, РФ
Березин О.С., «Невафильм», г. Санкт-Петербург, РФ
Барский И.Д., к.т.н., ВГИК, г. Москва, РФ
Одинокое С.Б., д.т.н., МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, РФ
Раев О.Н., к.т.н., ВГИК, г. Москва, РФ
Волков А.С., к.т.н., Министерство культуры РФ

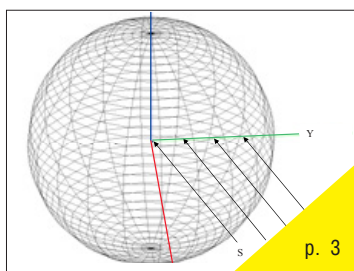
Отпечатано в ООО «ИПП «КУНА»
Объём 5 п.л. Заказ № 145974.
Тираж 1000 экземпляров.

Свидетельство о регистрации
СМИ-ПИ № ФС77-65712 от 13 мая 2016 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

2018-1 (12) CONTENT



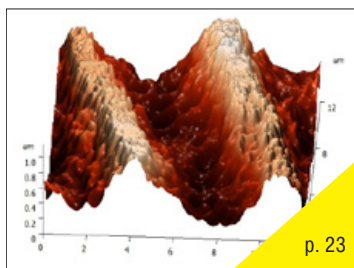
Theory

Y. Indlin, 7654081@mail.ru
Are equations for calculating reverberation time correct? 3



Technology

S. Lavrushkin, D. Vatolin, dmitriy@graphics.cs.msu.ru
Development of channel mismatch detection algorithm for stereoscopic video 12



I. Molodetskikh, ivan.molodetskikh@graphics.cs.msu.ru,
D. Vatolin, dmitriy@graphics.cs.msu.ru
Automatic editing map construction to detect differences between film versions 18

A. Smyk, smykholography@gmail.com, A. Shurygin
Asymmetric profiles in surface-relief holograms 23



Standardization

L. Tikhonova, at_kte@mail.ru
The method of measuring the frequency-dependent amplitude nonlinearity of the amplifiers of audio signals. Part 2: Description of the method of measuring dynamic intermodulation distortion 31

Movie history

N. Maiorov, henrymay@mail.ru
The very first in the history of development world cinematography (continued) 36

The requirements for the publication of scientific articles in the journal «World of technique of cinema»:

1. Articles (papers) are submitted in electronic format, by mail Kevin@paradiz.ru, volume of no more than 40 000 characters.
2. Pictures must be sent as separate files in JPG or TIF format with a resolution of at least 300 dpi.
3. Articles (papers) should contain (in Russian and in English):
 - the name,
 - annotation,
 - keywords.
4. Authors must conclude a license agreement for publication.
5. Graduate students are not charged for publication.

Electronic version www.elibrary.ru

Subscription index Rospechat: № 81923

Scientific and Technical Journal «World of Technique of Cinema» is published 4 times per year

Publisher by «IPP «CUNA» Ltd. Founded by «IPP «CUNA» Ltd. and branch «Cinema and photo research institute» JSC «Gorky film studio».

Certificate of Registration Media-PI № FS77-65712 May 13, 2016.

www.mtk-magazine.ru,
e-mail: kevin@paradiz.ru,
tel. (fax): +7 (495)795-0297,795-0299

Chairman Ph.D. Yu.Indlin

Members of the editorial board:
Dst. Y. Ovechkis, Moscow Polytechnic University, RF
Dst. prof. G. Tihomirova, SPbGUCT, Sankt-Petersburg, RF
Dst. prof. G. Vishnyakov, FSUE «VNIIOFI», Moscow, RF
Dst. M. Sakvarelidze, VGIK, Moscow, RF
Dst. prof. A. Vinokur, Moscow Polytechnic University, RF
O. Berezin, Nevafilm, Sankt-Petersburg, RF
Dst. prof. C. Odinkov, Bauman MSTU, Moscow, RF
Ph.D. A. Peregudov, RTR, RF
Ph.D. I. Barsky, VGIK, Moscow, RF
Ph.D. O. Raev, VGIK, Moscow, RF
Ph.D. A. Volkov, Ministry of Culture RF.

No part of this issue may be reproduced without written permission of the publisher, reference to the journal is obligatory. World of Technique of Cinema owns the copyrights to all published material, unless otherwise stated. Statements and opinions expressed in articles or editorials are expressions of contributors and do not necessarily represent the policies or opinions of Board of Editors. Opinion of editorial boards and of reviewers do not always coincides with the point of view of authors of articles. Advertisements appearing in the publication are the sole responsibility of the advertiser.

Printed in Russia.



ВЕРНЫ ЛИ ФОРМУЛЫ для расчёта времени РЕВЕРБЕРАЦИИ?



Ю.А. Индлин, 7654081@mail.ru, к.т.н., филиал «Научно-исследовательский кинофотоинститут» АО «ТПО «Киностудия им. М. Горького», РФ

Аннотация

Классические статистические формулы (Эйринга, Сэбина) для расчёта времени реверберации базируются на среднем времени свободного пробега звука в помещении τ_{cp} . Измерения в компьютерной модели лучевым методом в программе EASE, имитирующим реверберационный процесс в помещениях, показали, что измеренное время реверберации T_{30} отличается от оценок, даваемых этими формулами. Расхождение объясняется с помощью математической модели, в которой рассматривается не только среднее τ_{cp} , но и дисперсия σ_1^2 времени свободного пробега.

Ключевые слова: статистическая акустика, время реверберации, компьютерное моделирование, лучевой метод, формула Эйринга, формула Сэбина.

■ Время реверберации – основной параметр акустики помещений.

Формулы для расчёта времени реверберации выводятся в рамках статистической акустики с использованием среднего времени τ_{cp} и средней длины L_{cp} свободного пробега.

Расчёт времени реверберации проводится, в основном, по формуле Эйринга или по её упрощённому варианту – формуле Сэбина.

Классический вывод формулы Эйринга предусматривает излучение звука источником в помещении в течение времени, достаточного для достижения стационарного значения плотности энергии e_0 , после чего источник зву-

ARE EQUATIONS FOR CALCULATING REVERBERATION TIME CORRECT?

Y. Indlin, 7654081@mail.ru, Ph.D, branch «Cinema and Photo Research Institute» JSC «Gorky film Studio», Russia

Abstract

Classical statistical equations (Eyring, Sabine) for the calculation of reverberation time is based on an average time of free run of sound τ_a . Measurements in the computer model by the ray-tracing method in the EASE program, simulating the reverberation process in the rooms, showed that the measured reverberation time T_{30} differs from the estimates given by these equations. This discrepancy is explained by a mathematical model that deals not only with the mean τ_a , but also with the variance σ_1^2 of the free run time.

Keywords: statistical acoustics, reverberation time, computer modeling, ray-tracing method, the equation Ayring, the equation Sabine.

ка выключается в момент $t = 0$. Считая, что акты поглощения при отражении от поверхностей с коэффициентом поглощения α происходят через равные промежутки времени τ_{cp} , и после каждого акта в помещении остаётся $\beta = (1 - \alpha)$ начальной энергии, напишем последовательность убывающих во времени значений плотности $e(t)$ звуковой энергии (при игнорировании потерь в воздухе):

$$\begin{aligned} e(0) &= e_0, \\ e(\tau_{cp}) &= e_0 \beta, \\ e(2\tau_{cp}) &= e_0 \beta^2, \\ &\dots\dots\dots \\ e(n\tau_{cp}) &= e_0 \beta^n. \end{aligned}$$

Время реверберации – это момент времени $T_{60} = n\tau_{cp}$, в который общая энергия после выключения источника звука уменьшается на 60 дБ, т.е. $\beta^n = 10^{-6}$. Отсюда получаем

$$\beta^{T_{60}/\tau_{cp}} = 10^{-6} \\ T_{60} = -6\tau_{cp} / \log \beta \quad (1)$$

Согласно статистической теории

$$\tau_{cp} = L_{cp}/c = 4V/cS, \quad (2)$$

где V – объём помещения, S – площадь поверхностей, c – скорость звука.

Перейдя в (1) к натуральному логарифму, подставив (2) в (1) и выбрав $c = 343$ м/с, получим формулу Эйринга:

$$T_{60} = T_3 = -0.161V/S \ln \beta = -0.161V/S \ln(1 - \alpha). \quad (3)$$

Для импульсных измерений времени реверберации и компьютерного моделирования больше подходит современная модификация классического вывода.

Если источник звука в момент $t = 0$ излучает в разных направлениях одновременно большое количество энергетических частиц с общей энергией E_0 , то предполагается, что поглощение энергии будет происходить через равные промежутки времени τ_{cp} , и последовательность событий в начале каждого промежутка времени запишется так:

$$E(0) = E_0, \\ E(\tau_{cp}) = E_0 \beta, \\ E(2\tau_{cp}) = E_0 \beta^2, \\ \dots \\ E(n\tau_{cp}) = E_0 \beta^n.$$

Время реверберации – это момент времени $T_{60} = n\tau_{cp}$, в который общая энергия уменьшается на 60 дБ, т.е. $\beta^n = 10^{-6}$. Отсюда получаем (1), (2) и (3).

Если рассмотреть движение одной энергетической частицы вдоль луча, определяющего направление её движения, то можно признать логичным, что статистические свойства приписываются её движению после первого отражения.

Однако вызывает сомнение первый временной интервал (от 0 до τ), поскольку промежуток времени от излучения до первого отражения детерминирован положением источника и направлением излучения частицы.

Чтобы учесть это, обозначим через τ_m время движения m -ой частицы с энергией ε_0 от излучения до первого отражения.

Тогда последовательность событий в конце каждого промежутка времени запишется так:

$$\varepsilon(\tau_m) = \varepsilon_0, \\ \varepsilon(\tau_m + \tau_{cp}) = \varepsilon_0 \beta, \\ \varepsilon(\tau_m + 2\tau_{cp}) = \varepsilon_0 \beta^2, \\ \dots \\ \varepsilon(\tau_m + n\tau_{cp}) = \varepsilon_0 \beta^n$$

Время реверберации – это момент времени $T_{60} = \tau_m + n\tau_{cp}$, в который энергия затухает на 60 дБ, т.е. $\beta^n = 10^{-6}$. Отсюда получаем

$$T_{60} = \tau_m - 6\tau_{cp} / \log \beta$$

И, следовательно,

$$T_{60} = \tau_m + T_3 \quad (4)$$

Из (4) следует, что время реверберации частицы складывается из статистической части T_3 , определяемой формулой Эйринга, и начальной размерной части τ_m , определяемой геометрией помещения, направлением излучения и расположением источника.

Кажется, что (4) покушается на основное достоинство реверберационной формулы: $T_{60} = 0$ при $\alpha = 1$ (или $\beta = 0$), т.е. при полном поглощении звука поверхностями помещения время реверберации должно равняться нулю. В действительности, никакого противоречия с определением времени реверберации нет: при $\beta = 0$ имеем $T_{60} = \tau_m$, т.е. после выключения источника звука энергетической частице нужно время τ_m , чтобы достигнуть поглощающей поверхности и при $t > \tau_m$ энергия уменьшится на 60 дБ (и даже больше).

Другое сомнение заключается в том, что использование в выводе статистической формулы только лишь среднего значения τ_{cp} случайной величины времени свободного пробега τ при игнорировании её дисперсии может оказаться чрезмерным упрощением.

Если отказаться от этого упрощения, то при движении одной энергетической частицы на первом шаге реверберационного процесса получим:

$$\varepsilon(\tau_m + \tau_1) = \varepsilon_0 \beta,$$

где τ_1 – свободный пробег первого отражения, являющийся реализацией случайной величины τ со средним τ_{cp} и дисперсией σ_1^2 .

На k -м шаге получим:

$$\varepsilon(\tau_m + t_k) = \varepsilon_0 \beta^k,$$

где $t_k = \tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_k$ – время прихода k -го отражения к поверхности помещения, τ_k – время свободного пробега k -го отражения.

При таком подходе t_k можно считать случайной величиной со средним $k\tau_{cp}$ и дисперсией $k\sigma_1^2$.

При увеличении k временной интервал между средними соседних порядков отражений, например, между $k\tau_{cp}$ и $(k-1)\tau_{cp}$, остаётся неизменным, в то время как дисперсия $k\sigma_1^2$ растёт. Поэтому в момент t_k в помещении останутся отражения более ранних порядков с более высокими уровнями, что должно привести к увеличению времени реверберации. Поэтому, согласившись со случайным характером свободного пробега, мы приходим к формуле

$$T_{60} = \tau_m + \delta T + T_3. \quad (5)$$

Различия в величине τ_m при $1 \leq m \leq N$, где N – общее число энергетических частиц, приведёт к различиям во времени начала статистической части реверберационного процесса различных энергетических частиц и вызовет дополнительное увеличение времени реверберации в помещении на величину $\delta\tau_n$, поэтому:

$$T_{60} = \delta\tau_n + \delta T + T_3. \quad (6)$$

T_{60} в (6) оценивает реверберационный процесс как изменение общей энергии в помещении и поэтому может считаться глобальным временем реверберации.

Измерение времени реверберации проводится в точке помещения, и такая оценка глобального времени реверберации T_{60} должна называться локальным временем реверберации $T_{\text{лок}}$.

Измерение $T_{\text{лок}}$ обычно проводится не в полном соответствии с определением глобального времени реверберации. Анализ проводится не с момента выключения источника звука, а с момента начала реверберационного процесса в точке измерения, и оценивается не время, а скорость реверберационного процесса на сравнительно гладком участке, и эта оценка экстраполируется на затухание до уровня – 60 дБ.

Проверить (6) можно в условиях, когда все частицы имеют одинаковые начальные и статистические участки траектории их движения.

Такую возможность предоставляет лучевой метод компьютерного моделирования (модуль AURA программы EASE), применённый для расчётов в модели шарового помещения R20 радиусом 20 м с источником звука S шаровой направленности в центре модели (рис. 1).

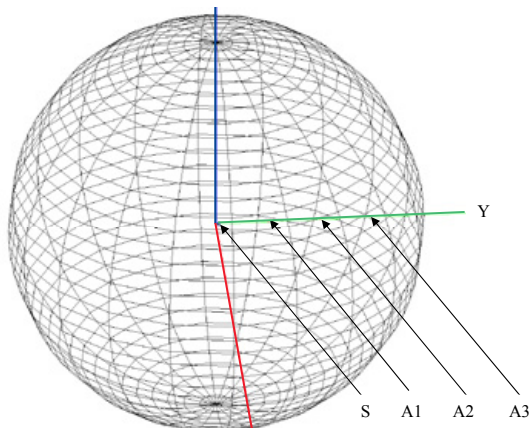


Рис. 1. Компьютерная модель шара R20; S – источник звука, A1, A2, A3 – приёмные зоны

В этой модели с одинаковыми коэффициентами поглощения поверхностей и диффузным ($s = 100\%$) рассеянием при отражении для всех частиц начальные участки траекторий равны ($\tau_m = R/c = 58$ мс при любом m), а после первого отражения в наибольшей степени учтены допущения, применяемые при выводе статистических формул ($s = 100\%$).

Небольшие приёмные зоны A1, A2, A3 размещались на оси Y модели на расстояниях 5, 10 и 15 м. Вблизи источника на той же оси располагался небольшой экран, закрывающий приёмные точки от прямого звука.

В точках приёмной зоны лучевым модулем AURA программы рассчитывалась импульсная реакция.

При лучевом методе источник одновременно излучает достаточно большое число разнонаправленных энергетических частиц, имитирующих характеристику направленности источника (обычно – шаровую). Приёмником сигналов служит сферическая поверхность небольшого радиуса (в данном программном модуле по нашим измерениям она имеет радиус около 0.5 м). Если луч проходит через приёмную сферу, то программа включает его в импульсную реакцию с соответствующим временем задержки относительно момента излучения звука источником.

Пример результата измерений в компьютерной модели дан на рис. 2.

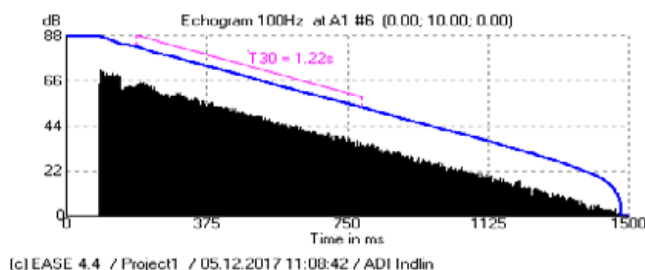


Рис. 2. Импульсная реакция в модели R20 при $Y = 10$ м, $\beta = 0.4$, $T_3 = 1.16$ с

Для оценки локального времени реверберации в программе используется метод обратного интегрирования Шредера. Согласно этому методу, каждому моменту времени t импульсной реакции приписывается суммарная энергия импульсного отклика за интервал времени от t до ∞ . Зависимость суммарной энергии от времени образует реверберационную кривую (синяя линия над импульсной реакцией), по которой оценивается время снижения уровня от – 5 дБ до – 35 дБ (т.е. на 30 дБ), и оно умножается на 2 для получения времени реверберации, которое обозначается как T_{30} (эта оценка помещена над синей линией).

Можно сказать, что шредеровская реверберационная кривая – это локальная (для данной точки приёма) интерпретация вышеприведённой последовательности уменьшения энергии частиц в помещении.

Действительно, зависимость от времени суммарной энергии всех частиц в помещении при возбуждении в нём импульса можно назвать глобальной импульсной реакцией помещения $\partial(t)$. При выводе (4) в момент времени $t_k = \tau_m + kt$ величина энергии $\varepsilon(t_k)$, представляла собой энергию, которой предстоит поглотиться при $t > t_k$, т.е.

$$\varepsilon(t_k) = \int_{t_k}^{\infty} \partial(t) dt \quad (7)$$

Пусть $s(t)$ – локальная импульсная реакция помещения. При построении шредеровской реверберационной кривой $\sigma(t)$ в момент времени t_k точка этой кривой $\sigma(t_k)$ представляет собой энергию, которой предстоит поглотиться при $t > t_k$, т.е.

$$\sigma(t_k) = \int_{t_k}^{\infty} s(t) dt \quad (8)$$

Из сравнения (7) и (8) видно, что локальная величина $\sigma(t_k)$ представляет собой просто часть глобальной величины $\varepsilon(t_k)$; можно даже сказать – какую часть, сравнив объёмы модели (33500 м³) и приёмной сферы (0.27 м³).

Поэтому вполне естественно утверждение, что локальная величина T_{30} , усреднённая по ряду точек помещения, будет служить достоверной оценкой глобальной величины T_{60} в нашем эксперименте (в общем случае, T_{30} – оценка статистической части T_{60}).

Время реверберации рассчитывалось по формуле Эйринга T_3 с учётом потерь в воздухе:

$$T_3 = 0.161V / (-\ln\beta + 4mV),$$

где V и S брались в статистическом модуле (Room RT) программы EASE, m – показатель потерь, брался в [1].

Измеренное абсолютное расхождение $\delta T_{изм} = T_{30} - T_3$ между оценками времени реверберации показано на рис. 3; усреднение по 12 точкам трёх приёмных зон при каждом β , расхождение результатов в точках при каждом измерении не превышало 10 мс.

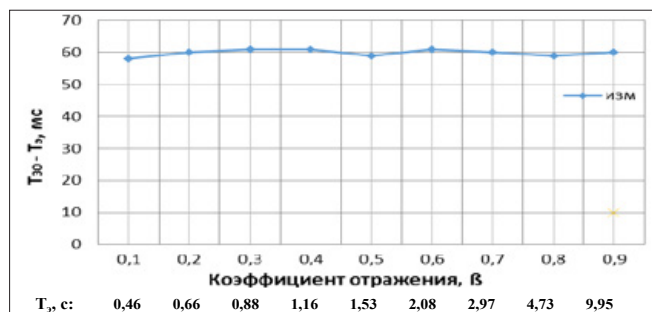


Рис. 3. Зависимость от α абсолютного отклонения оценок времени реверберации T_3 от T_{30} в шаровой модели R20 при $s = 100\%$; $\delta T_{изм} = 60$ мс – среднее значение

Таким образом, даже в идеальных условиях шаровой модели

$$T_{60} = T_{30} > T_3.$$

Рассмотрим этот эксперимент более детально.

Максимальный разброс случайной величины τ_1 – времени пробега отражений первого порядка – достигает величины $2R/c$ (минимальное, близкое к нулю, время даёт пробег до соседней площадки, максимальное даёт пробег до противоположной части шара). В условиях таких ограничений можно принять распределение случайной величины τ_1 в первом приближении равномерным (прямоугольным).

Дисперсия случайной величины, равномерно распределённой на отрезке с границами a и b , даётся выражением

$$\sigma_p^2 = (b - a)^2 / 12$$

Для шара с границами 0 и $2R/c$ она определяется выражением

$$\sigma_1^2 = R^2 / 3c^2 = 0.00113 \text{ с}$$

Время t_n прихода в точку приема отражений n -го порядка является суммой случайных величин времени свободного пробега ранних порядков, т.е.

$$t_n = \tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_n$$

Согласно классической центральной предельной теореме, если случайные одинаково распределённые величины имеют конечное математическое ожидание (τ_{cp}) и дисперсию (σ_1^2), то их сумма (t_n) стремится к нормальному распределению с параметрами:

$n\tau_{cp}$ – математическое ожидание (среднее время), $n\sigma_1^2$ – дисперсия.

В нашем случае:

$\tau_{cp} = 4R/3c = 0.078$ с – среднее время свободного пробега частицы,

$t_n = n\tau_{cp} = 4nR/3c = 0.078n$ – среднее времени пробегов отражений n -го порядка,

$\sigma_1^2 = 0.00113$ – дисперсия времени пробега отражений 1-го порядка,

$\sigma_n^2 = n\sigma_1^2 = 0.00113n$ – дисперсия времени пробега отражений n -го порядка,

$\sigma_1 = 0.034$ – стандартное отклонение времени пробега отражений 1-го порядка.

$\sigma_n = 0.034n^{0.5}$ – стандартное отклонение пробега отражений n -го порядка.

В табл. 1 (строки 1–3) приведены параметры нескольких порядков отражений; их графическая иллюстрация в виде распределений плотности вероятностей представлена на рис. 4.

Рассмотрим ситуацию в точке t_7 (вертикальная линия на рис. 4); отражения меньших порядков ($n \leq 4$) не достигают этой временной точки из-за ограничения максимального времени свободного пробега величиной $2R/c = 117$ мс.

Строка 4 табл. 1 даёт расстояние среднего n -ой кривой от $t_7 = 546$ мс в единицах σ_n .

Если функции распределения плотности вероятности обозначить через $f_n(x)$, то строка 5 даст плотность вероятности прихода отражений разных порядков в точку t_7 .

Перейдём от плотности вероятности $f_n(x_n)$ к вероятности $F_n(\partial t_7)$ прихода отражений в короткий временной интервал ∂t_7 (например, 1 мс) с центром в точке t_7 . Для отражений 7-го порядка получим:

$$F_7(\partial t_7) = f_7(x_7) \partial t_7$$

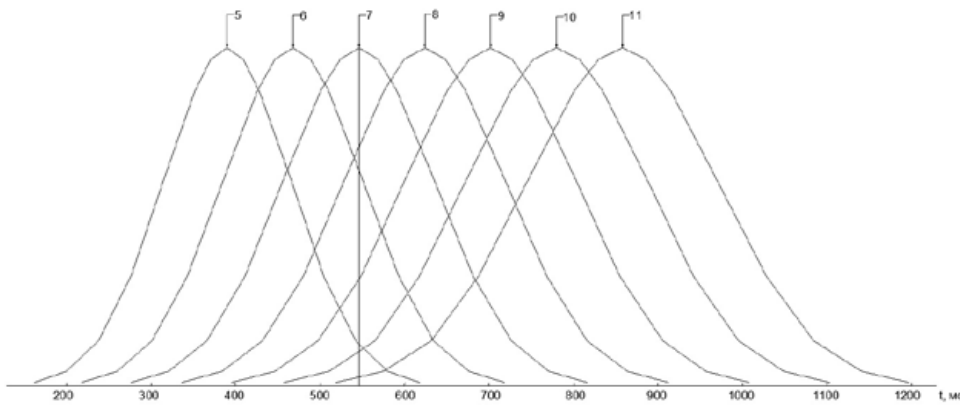


Рис. 4. Распределения плотности вероятности времени прихода отражений разных порядков (номер порядка указан в качестве параметра кривых)

ной реакции оказывается неизменным. Поэтому соотношение этих величин при учёте уровней отражений позволяет оценить $T_{лок}$.

Действительно. Временной интервал между соседними точками равен $0.1\tau_{cp}$. Если отношение суммарных вероятностей в соседних точках обозначить δF , т.е.

$$\delta F = \frac{\sum \beta^{(n-4)} F_n(\partial t_{7,1})}{\sum \beta^{(n-4)} F_n(\partial t_7)}, \quad (9)$$

то получим локальное время реверберации во временном интервале $[t_7, t_{7,1}]$:

$$T_{лок}[t_7, t_{7,1}] = -0.6\tau_{cp}/\log(\delta F) \quad (10)$$

Для отражений других порядков в точке t_7 получим:

$$F_n(\partial t_7) = f_n(x_n) \partial t_7 \sigma_7 / \sigma_n$$

Значения $F_n(\partial t_7)$ при $\partial t_7 = 1$ даются в строке 6 табл. 1.

Аналогичный расчёт для точки $t_7 + \Delta$ приведён в табл. 2; величина Δ для удобства расчёта выбрана равной $0.1 \tau_{cp}$.

Из табл. 1 и 2 видно: суммарные вероятности прихода отражений в интервалы $\partial t_{7,1}$ и ∂t_7 (строки 7) практически совпадают. Это означает, что количество отражений в равные временные интервалы локальной импульс-

Здесь не учитываются потери в воздухе, которые на низких частотах и на коротком временном интервале не имеют практического значения.

Если все отражения имеют одинаковый уровень ($\beta = 1$), то теоретически должно выполняться $T_{лок}[t_7, t_{7,1}] = \infty$.

Подставляя данные табл. 1 и 2 (строки 7) в (9) и (10) и полагая $\beta = 1$, получим оценку

$$T_{лок}[t_7, t_{7,1}] = 1240 \text{ с,}$$

Табл. 1. Расчёт вероятности прихода отражений в 1-мс интервал ∂t_7 вокруг $t_7 = 546$ мс ($n = 7$)

1	Порядок отражения, n	5	6	7	8	9	10	11
2	$t_n = n\tau_{cp} = 78n$, мс	390	468	546	624	702	780	858
3	$\sigma_n = 34n^{0.5}$, мс	76	83.3	90	96.2	102	107.5	112.8
4	$x_n = (7 - n) \tau_{cp} / \sigma_n$	2.052	0.937	0	-0.811	-1.529	-2.176	-2.767
5	$f_n(x_n)$	0.0486	0.257	0.399	0.287	0.124	0.037	0.0087
6	$F_n(\partial t_7) = f_n(x_n) \sigma_7 / \sigma_n$	0.0575	0.2779	0.399	0.2686	0.1092	0.0313	0.0069
7	$\sum F_n(\partial t_7)$			1.15036				
8	$0.4^{(n-4)} F_n(\partial t_7) 10^3$	23.002	44.466	25.532	6.875	1.1187	0.128	0.0113
9	$\sum 0.4^{(n-4)} F_n(\partial t_7) 10^3$			101.1346				

Табл. 2. Расчёт вероятности прихода отражений в 1-мс интервал $\partial t_{7,1}$ вокруг $t_7 + \Delta = 553.8$ мс

1	Порядок отражения, n	5	6	7	8	9	10	11
2	$t_n = n\tau_{cp} = 78n$, мс	390	468	546	624	702	780	858
3	$\sigma_n = 34n^{0.5}$, мс	76	83.3	90	96.2	102	107.5	112.8
4	$x_n = (7.1 - n) \tau_{cp} / \sigma_n$	2,155	1,03	0,0867	-0,73	-1,456	-2,104	-2,698
5	$f_n(x_n)$	0.0392	0.2347	0.3974	0.3056	0,1388	0,0436	0.0105
6	$F_n(\partial t_{7,1}) = f_n(x_n) \sigma_7 / \sigma_n$	0.0463	0.2535	0.3974	0.2859	0.1224	0.0365	0.0084
7	$\sum F_n(\partial t_{7,1})$			1.15045				
8	$0.4^{(n-4)} F_n(\partial t_{7,1}) 10^3$	18.537	40.554	25.437	7.319	1.254	0.159	0.014
9	$\sum 0.4^{(n-4)} F_n(\partial t_{7,1}) 10^3$			93.2635				

которая вполне может рассматриваться как бесконечно большое значение.

Рассмотрим ситуацию в интервалах ∂t_7 и $\partial t_{7,1}$ при $\beta = 0.4$ (строки 8 и 9 в табл. 1 и 2), что соответствует рис. 2 (множитель 10^3 добавлен для более удобного представления малых величин).

Используя (9) и (10) и строку 9, получим: $T_{лок}[t_7, t_{7,1}] = 1.330$ с.

Без учёта поглощения в воздухе при $\beta = 0.4$ и $\tau_{ср} = 0.078$

$$T_3 = -6\tau_{ср} / \log \beta = 1.176.$$

Отсюда получаем дисперсионную поправку $\delta T_{расч}$ к оценке по Эйрингу:

$$\delta T_{расч} = T_{лок}[t_7, t_{7,1}] - T_3 = 1.330 - 1.176 = 0.154 \text{ с.}$$

Эта величина существенно отличается от измеренной в компьютерной модели ($\delta T_{изм} = 0.060$ на рис. 3), что можно объяснить определённой произвольностью допущения о прямоугольном характере распределения τ_1 . Специальный эксперимент в компьютерной модели показал, что одна часть распределения (справа от среднего) действительно близка к прямоугольной форме, в то время как другая часть (слева от среднего) имеет форму скорее треугольную. Поэтому предварительная оценка стандартного отклонения ($\sigma_1 = 34$ мс) оказалась завышенной.

Чтобы определить действительное σ_1 , согласующееся с результатами измерений в компьютерной модели, были проведены расчёты в математической модели, построенной в Excel по образцу табл. 1 и 2, зависимости дисперсионной поправки $\delta T_{расч}$ от σ_1 в трёх участках локальной импульсной реакции: n7 – в интервале $[t_7, t_{7,1}]$ (как в табл. 1 и 2), n10 – в интервале $[t_{10}, t_{10,1}]$ и n13 – в интервале $[t_{13}, t_{13,1}]$ (рис. 5).

Из рис. 5 видно, что измеренная в компьютерной модели величина $\delta T_{изм}$ совпадает с рассчитанной в математической модели величиной $\delta T_{расч}$ при $\sigma_1 = \sigma_d = 26.5$ мс = 0.0265 с.

Отсюда определяется коэффициент вариации:

$$V = 100\sigma_1 / \tau_{ср} = 34\%.$$

Следует отметить, что при больших σ_1 расчёт показывает противоестественное увеличение $T_{лок}$ с уменьшением t_n ; это можно объяснить уменьшением точности предсказаний центральной предельной теоремы при уменьшении n.

Расчёты с действительной $\sigma_d = 26,5$ мс показали, что $\delta T_{расч}$ практически не зависит от β (рис. 6), что согласуется с экспериментальными данными, полученными в компьютерной модели (рис. 3).

Увеличение в модели шара вдвое радиуса (и, следовательно, $\tau_{ср}$) даёт увеличение вдвое измеренного в компьютерной модели $\delta T_{изм}$ и рассчитанного в математи-

ческой модели σ_1 . Поэтому в шаре любого радиуса величины $\delta T_{изм}$ и $\tau_{ср}$ можно связать индексом k_ϕ , т.е.:

$$\delta T_{изм} = k_\phi \tau_{ср} \tag{11}$$

Учитывая, что в модели R20 мы имели $\delta T_{изм} = 0.06$, а $\tau_{ср} = 0.078$, получим:

$$k_\phi = \delta T_{изм} / \tau_{ср} = 0.77.$$

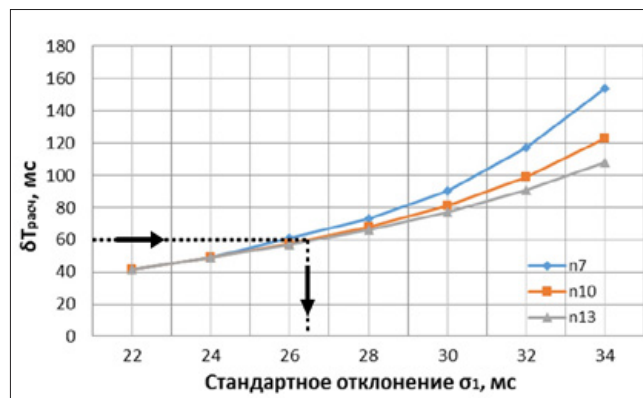


Рис. 5. Рассчитанная зависимость дисперсионной поправки $\delta T_{расч}$ от стандартного отклонения σ_1

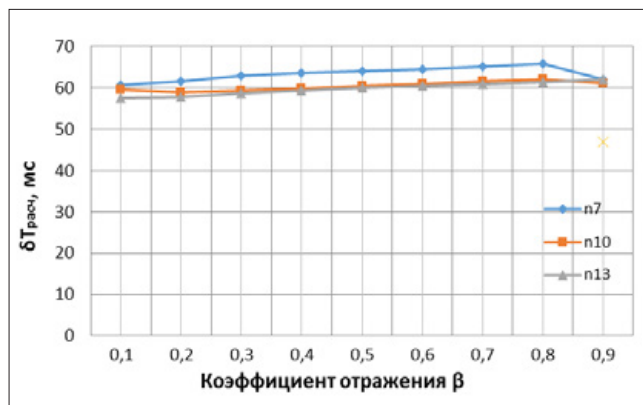


Рис. 6. Рассчитанная зависимость дисперсионной поправки $\delta T_{расч}$ от коэффициента отражения β

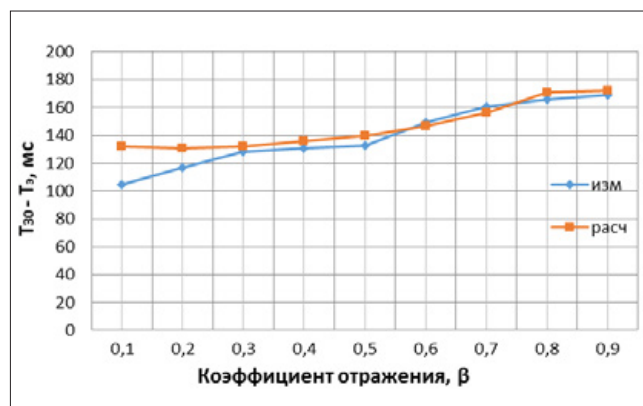


Рис. 7. Зависимость от β отклонения оценок времени реверберации T_3 от T_{30} в кубической модели K32 при $s = 100\%$ и экранировании прямого звука

С другой стороны, расчёт в математической модели R20 при $\delta T = \delta T_{\text{расч}} = \delta T_{\text{изм}}$ дал:

$$\sigma_1 / \tau_{\text{ср}} = 0.34 \text{ или } \tau_{\text{ср}} = 2.94\sigma_1,$$

откуда, используя (11), получим:

$$\delta T = 2.26\sigma_1$$

Таким образом, для шара любого радиуса

$$\delta T = 0.77 \tau_{\text{ср}} = 2.26\sigma_1$$

Перемещение источника из центра (координата $Y = 0$) ближе к стенке ($Y = -19$ м) должно было показать влияние поправки $\delta\tau_n$ в (6). Однако измерения показали, что такое смещение (при $\beta = 0.4$) приводит к увеличению времени реверберации всего на 3 мс, т.е. в 20 раз меньше дисперсионной поправки. Поэтому от учёта поправки $\delta\tau_n$ вполне можно отказаться.

Рассмотрим модель кубической формы.

На рис. 7 представлены результаты измерений в кубической модели M32 (длина ребра 32 м), близкой по объёму к шаровой модели R20, при центральном расположении источника, при расстоянии до приёмных поверхностей 4, 8 и 12 м при экранировании прямого звука.

Среднее значение расхождения равно 140 мс. Таким образом, для M32 имеем

$$\tau_{\text{ср}} = 0.062, \delta T = 0.140, k_{\text{ф}} = 2.26.$$

Расчёты в математической модели (рис. 7) дали хорошее совпадение с результатами измерений в компьютерной модели при $\sigma_1 = 0.037$. Поэтому

$$\delta T = 2.26\tau_{\text{ср}} = 3.79\sigma_1$$

Отсюда определяется коэффициент вариации:

$$V = 100\sigma_1 / \tau_{\text{ср}} = 60\%.$$

Для прямоугольного параллелепипеда П32-2х1х1 (с пропорций 2х1х1, с меньшим ребром 32 м) результаты измерений приведены на рис. 8.

Среднее значение расхождения равно 173 мс. Для данного случая

$$\tau_{\text{ср}} = 0.0746, \delta T = 0.173, k_{\text{ф}} = 2.32.$$

Расчёты в математической модели (рис. 8) дали хорошее совпадение с результатами измерений в компьютерной модели при $\sigma_1 = 0.045$. Поэтому

$$\delta T = 2.32\tau_{\text{ср}} = 3.84\sigma_1 \\ V = 60\%.$$

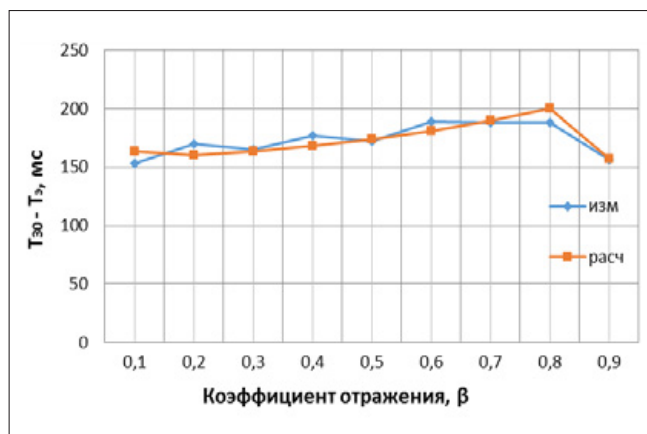


Рис. 8. Зависимость от β отклонения оценок времени реверберации T_3 и $T_{3с}$ от T_{30} в параллелепипеде П32-2х1х1 при $s = 100\%$ и экранировании прямого звука

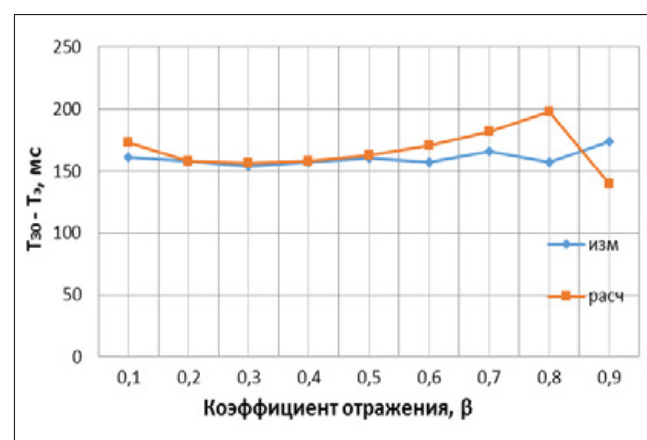


Рис. 9. Зависимость от β отклонения оценок времени реверберации T_3 и $T_{3с}$ от T_{30} в параллелепипеде П16-4х2х1 при $s = 100\%$ и экранировании прямого звука

Для прямоугольного параллелепипеда П16-4х2х1 (с пропорций 4х2х1, с меньшим ребром 16 м) результаты измерений приведены на рис. 9.

Среднее значение расхождения равно 160 мс. Для данного случая

$$\tau_{\text{ср}} = 0.0533, \delta T = 0.160, k_{\text{ф}} = 3,0.$$

Расчёт в математической модели (рис. 9) показал хорошее совпадение с результатами измерений в компьютерной модели при $\sigma_1 = 0.036$. Поэтому

$$\delta T = 3,0\tau_{\text{ср}} = 4,41\sigma_1 \\ V = 68\%.$$

Для упрощённой модели концертного зала объёмом 12600 м³ результаты измерений даны на рис. 10.

Среднее значение расхождения равно 140 мс. Для данного случая

$$\tau_{\text{ср}} = 0.0377, \delta T = 0.138, k_{\text{ф}} = 3,66.$$

Расчёты в математической модели (рис. 10) дали хорошее совпадение с результатами измерений в компьютерной модели при $\sigma_1 = 0.026$. Поэтому

$$\delta T = 3.66\tau_{cp} = 5.35\sigma_1$$

$$V = 68\%.$$

Итак, при $s = 100\%$ результаты измерений T_{30} превосходят результаты расчёта по формуле Эйринга T_3 на дисперсионную поправку δT :

$$T_{30} = T_3 + \delta T = T_3 + k_{\phi} \tau_{cp} = T_3 + k_m \sigma_1 \quad (12)$$

где индексы k_{ϕ} , k_m и $V = 100k_{\phi}/k_m = 100\sigma_1/\tau_{cp}$, приведены в табл. 3:

Табл. 3 показывает, что в шаре коэффициент вариации V минимален по величине, и с усложнением формы модели он растёт. Две последние строки показывают, что для залов обычных пропорций $V = 68\%$, т.е. $\sigma_1 = 0.68\tau_{cp}$.

В теории статистической акустики утверждается, что необходимым условием для вывода формулы Эйринга является диффузность звукового поля. Однако введение дисперсии в статистическую теорию показало, что, напротив, диффузное звуковое поле – гарантия неточности этой формулы.

Конечно, отсутствие рассеяния при отражении не приводит к верности формулы Эйринга из-за сохраняющегося в общем случае различия во времени свободного пробега энергетических частиц, требующего учёта дисперсии времени свободного пробега τ . Единственное исключение – рассмотренная выше модель шарового помещения с центрально расположенным источником: здесь τ_1 в отсутствие рассеяния (при $s = 0$) превращается в константу τ_{max} , равную $2R/c$. В этом случае формула Эйринга верна, но не с τ_{cp} , а с τ_{max} .

Формула Эйринга даёт оценку времени реверберации меньшую, чем T_{30} , на величину поправки δT :

$$T_3 = T_{30} - \delta T \quad (13)$$

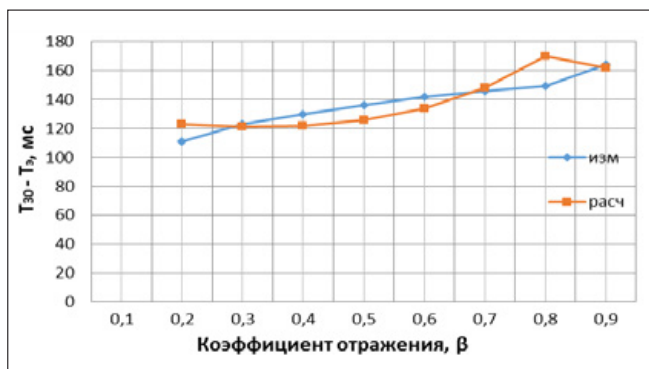


Рис. 10. Зависимость от β отклонения оценок времени реверберации T_3 и T_{3c} от T_{30} в упрощённой модели концертного зала при $s = 100\%$, без экранирования прямого звука

Табл. 3. Параметры дисперсионной поправки

Наименование	k_{ϕ}	k_m	V
Шар	0.77	2.26	34%
Куб	2.26	3.79	60%
Параллелепипед с пропорцией 2x1x1	2.32	3.84	60%
Параллелепипед с пропорцией 4x2x1	3.00	4.41	68%
Концертный зал	3.66	5.35	68%

Формула Сэбина (без учёта потерь в воздухе):

$$T_c = 0.161V/S\alpha$$

даёт оценку времени реверберации большую, чем T_3 на некоторую величину δT_{c3} , т.е.:

$$T_3 = T_c - \delta T_{c3} \quad (14)$$

Подставив (14) в (13), получим

$$T_c - \delta T_{c3} = T_{30} - \delta T \quad (15)$$

Если величины δT_{c3} и δT окажутся близки, то оценка по Сэбину T_c будет ближе к T_{30} , чем оценка по Эйрингу T_3 . Проверим это (игнорируя потери в воздухе).

$$\delta T_{c3} = T_c - T_3 = 0.161V/S[1/\alpha + 1/\ln(1 - \alpha)] \quad (16)$$

Ограничиваясь первыми членами разложения $\ln(1 - \alpha) = -\alpha - \alpha^2/2 - \dots$, имеем из выражения в квадратных скобках

$$1/\alpha + 1/\ln(1 - \alpha) = [\ln(1 - \alpha) + \alpha]/[\alpha \ln(1 - \alpha)] = [-\alpha^2/2]/[-\alpha^2] = 0.5. \quad (17)$$

В результате, из (16) и (17) получаем

$$\delta T_{c3} = T_c - T_3 = 0.08V/S = 0.02 L_{cp} = 6.86 \tau_{cp} \quad (18)$$

Полученный результат (18) может показаться странным.

Давно известно (см. например, [2]), что при небольших коэффициентах поглощения ($\alpha < 0.2$) в разложении

$$-\ln(1 - \alpha) = \alpha + \alpha^2/2 + \alpha^3/3 + \dots \quad (19)$$

можно отбросить все члены, кроме первого, и перейти от формулы Эйринга к более простой формуле Сэбина. Действительно, если в (17) ограничиться первым членом разложения (19), то $\delta T_{c3} = 0$, и этот переход обоснован.

Однако, если в (17) ограничиться не одним, а двумя первыми членами разложения (19), то полученный ре-

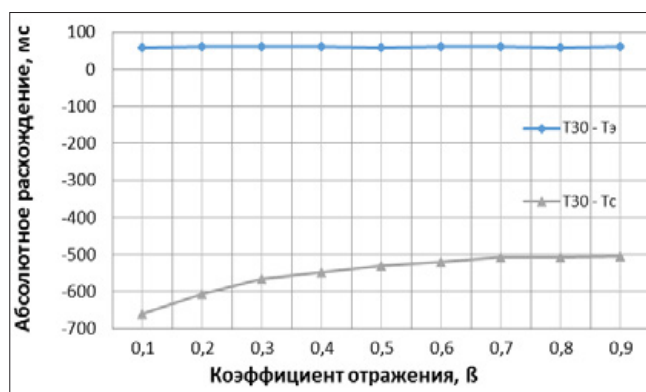


Рис. 11. Зависимость от β абсолютного расхождения между реверберацией импульсного отклика T_{30} и реверберацией, определяемой формулой Эйринга (верхняя кривая) и формулой Сэбина (нижняя кривая), в модели помещения R20

зультат (18) говорит о том, что в больших помещениях переход от формулы Эйринга к формуле Сэбина не оправдан даже при небольших α .

Вместе с тем, используя (12) и (18), можно перейти к новой статистической формуле:

$$T_{30} = T_c - 6.86 \tau_{cp} + \delta T \quad (20)$$

Для шара R20, имея в виду, что $\tau_{cp} = 0.078$, получаем:

$$\delta T_{сз} = 0.535 \text{ с}, \quad (21)$$

что на порядок превышает δT .

Чтобы убедиться в этом, в модели R20 наряду с T_3 производился расчёт T_c . Результат представлен на рис. 11; верхняя кривая – из рис. 3.

На рис. 11 видно, что разность $\delta T_{сз}$ оценок T_3 по Эйрингу и T_c по Сэбину практически постоянна в обычно используемом диапазоне величин β и близка в оценке, полученной в (21). При этом оценка по Эйрингу существенно точнее оценки по Сэбину.

Для модели концертного зала ситуация не столь однозначна.

Из (12), (15) и (20) следует:

$$\begin{aligned} T_{30} &= T_3 + \delta T = T_3 + 3.66 \tau_{cp} \\ T_{30} &= T_c - 6.86 \tau_{cp} + 3.66 \tau_{cp} = T_c - 3.2 \tau_{cp} \end{aligned}$$

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Индлин Ю.А. Показатель затухания звука в воздухе залов. – indlin2014e.ucoz.ru
2. Фурдуев В.В. Акустические основы вещания. М. 1960.
3. СП 51.13330.2011 (СНиП 23-03-2003 в редакции 2011 г.). Защита от шума.

Как видно, локальное время реверберации T_{30} лежит между оценками T_c и T_3 , причём оценка по Сэбину оказывается даже чуть ближе к T_{30} (при малых β ситуация складывается не в пользу Сэбина).

Оценим условия, при которых погрешность оценок времени реверберации по формулам Эйринга и Сэбина не превышает допустимых значений.

Согласно [3] «погрешность расчётов времени реверберации не должна превышать 0.05 с».

Принимая ошибку расчёта по формулам Эйринга и Сэбина в обычных помещениях равной $3.5 \tau_{cp}$, из соотношения $3.5 \tau_{cp} = 0.05$, получим граничные значения параметров:

$$\tau_{cp} = 0.014 \text{ с}, \quad L_{cp} = 4.9 \text{ м.}$$

Т.е. в небольших помещениях с параметрами, меньше граничных, ошибка расчёта по статистическим формулам согласно [3] допустима.

Заключение

Классические статистические формулы (Эйринга, Сэбина) для расчёта времени реверберации базируются на среднем времени свободного пробега звука τ_{cp} .

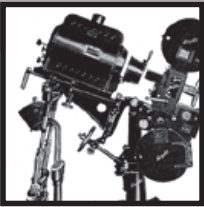
Измерения в компьютерной модели лучевым методом в программе EASE, имитирующим реверберационный процесс в помещениях, показали, что измеренное время реверберации T_{30} оказывается выше оценки T_3 , даваемой формулой Эйринга, и ниже оценки T_c , даваемой формулой Сэбина.

Учёт не только среднего τ_{cp} , но и дисперсии σ_1^2 времени свободного пробега выразился в математической модели, которая хорошо объяснила полученные результаты измерений T_{30} в компьютерной модели.

В новой статистической формуле, подтверждённой математической моделью, T_3 увеличивается на дисперсионную поправку δT , величина которой определяется статистическими параметрами τ_{cp} и σ_1 времени свободного пробега звука в помещении.

Выявленная связь между оценками T_3 и T_c позволила вывести формулу, в которой T_c уменьшается на поправку, величина которой определяется статистическими параметрами τ_{cp} и σ_1 .

Если рассматривать поправки как ошибки в расчётах по формулам Эйринга и Сэбина, то можно сказать, что эти ошибки допустимы лишь в небольших помещениях.



РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОИСКА ПЕРЕПУТАННЫХ РАКУРСОВ в стереофильмах



С.В. Лаврушкин, аспирант, Д.С. Ватолин, dmitriy@graphics.cs.msu.ru, к.ф.-м.н., лаборатория компьютерной графики и мультимедиа МГУ им. М.В. Ломоносова, РФ

Аннотация

Перепутанный порядок ракурсов – один из артефактов стереофильмов, вызывающий серьёзный дискомфорт при просмотре. Поэтому важно уметь находить и своевременно исправлять данный артефакт на этапе производства стереоконтента. В данной работе предложен метод автоматического поиска перепутанных ракурсов в стереофильмах, обладающий более высокой точностью по сравнению с существующими аналогичными методами. В дополнение к признакам, описанным в работе [5], были использованы свёрточные нейронные сети для анализа ракурсов и соответствующих им карт диспаратности. Для обучения свёрточных нейронных сетей подготовлена тренировочная выборка, состоящая из 113000 примеров. На полученных признаках обучены модели логистической регрессии и метода опорных векторов, результаты работы которых и используются для определения вероятности наличия перепутанных ракурсов в стереофильмах. Также была подготовлена тестовая выборка и проведено экспериментальное сравнение алгоритма с аналогами.

Ключевые слова: стереоскопическое видео, анализ качества, перепутанные ракурсы, машинное обучение, свёрточные нейронные сети.

■ Введение

Ежегодно выпускается большое число фильмов в 3D формате. Однако зрители стали реже ходить на стерео-

DEVELOPMENT OF CHANNEL MISMATCH DETECTION ALGORITHM FOR STEREOSCOPIC VIDEO

S. Lavrushkin, graduate student, D. Vatin, dmitriy@graphics.cs.msu.ru, Ph.D, Lomonosov Moscow State University, Russia

Abstract

Channel mismatch (the result of swapping left and right views) – one of the stereoscopic video artefacts, that can introduce major discomfort when viewing. Therefore, it is important to be able to detect and fix in proper time this artefact at the production stage. A novel channel mismatch detection method is presented in this work that has high accuracy in comparison with analogues. In addition to features, described in [5], convolutional neural networks were used to analyze views and corresponding disparity maps for presence of channel mismatch in the scene. A training set consisting of 113 thousand samples was prepared for convolutional neural networks training. Logistic regression and SVM models were trained on the resultant features and used for channel mismatch probability prediction. A test set was prepared and an experimental evaluation of the proposed method was performed.

Keywords: stereoscopic video, quality assessment, channel mismatch, machine learning, convolutional neural networks.

фильмы, предпочитая их 2D версии. В первую очередь это связано с качеством производимого стереоконтента. При создании стереоскопического контента появляется

целый ряд новых проблем, не возникающих при работе с 2D. Так, при съёмке 3D фильмов достаточно часто появляются геометрические несоответствия между ракурсами, а также несоответствия по цвету, яркости и чёткости. А в случае конвертации из 2D в 3D могут появиться такие артефакты, как деформация границ объектов, различия в размытости границ объектов, эффект кулисности и др., появление которых связано с использованием недостаточно точных карт глубины и плохой обработкой границ. Довольно часто после просмотра стереофильмов, содержащих большое количество данных артефактов, у людей возникают головные боли, усталость, определённого рода дискомфорт, из-за чего пропадает желание просмотра новых фильмов в формате 3D.

Перепутанный порядок ракурсов – один из артефактов стереофильмов, хотя перепутанные ракурсы являются менее распространённой проблемой, чем приведённые выше артефакты. Данный артефакт может появиться практически на любом этапе постпроизводства. Помимо того, что ракурсы можно банально поменять местами, эффект перепутанных ракурсов также возникает при неправильном наложении компьютерной графики и титров на исходные ракурсы стереофильмов.

Данный тип артефакта довольно трудно распознать, просто просматривая готовое 3D видео. Степень дискомфорта, возникающего при просмотре стереофильмов с перепутанными ракурсами, может зависеть от целого ряда факторов, таких как яркость, распределение диспаратности, а также особенности движения в сцене. При этом, если ракурсы перепутаны целиком, данный артефакт можно легко исправить: достаточно просто поменять местами левый и правый ракурсы. Таким образом, важно уметь определять наличие перепутанных ракурсов, так как при их исправлении значительно уменьшается дискомфорт при просмотре стереофильмов. Конечно, всё обстоит гораздо сложнее со сценами, в которых ракурсы перепутаны не целиком, в результате некорректной конвертации сцены из 2D в 3D, или наложения компьютерной графики и/или титров. Для корректирования таких сцен потребуется заново правильно применить соответствующие операции к исходным изображениям.

Обзор существующих методов

Проблеме поиска сцен с перепутанным порядком ракурсов в стереофильмах уделено мало внимания в научных работах. При этом большинство предложенных методов не применимы на практике при анализе стереоскопического видео, так как имеют большое число ложноположительных срабатываний.

В работе [1] приведены решения ряда проблем, связанных с 3D, в том числе, и решение проблемы поиска перепутанного порядка ракурсов. Описанный метод поиска перепутанных ракурсов заключается в вычислении корреляции между картой диспаратности для анализируемого кадра и шаблонной картой диспаратности. По-

ложительная корреляция означает, что в данном случае порядок ракурсов соблюден, отрицательная корреляция – порядок ракурсов перепутан. Шаблонная карта диспаратности была получена путём усреднения карт диспаратности, посчитанных для 6000 кадров. Данный подход имеет низкую точность, так как не всегда распределение диспаратности совпадает во всех сценах. Хотя таких сцен в реальных стереофильмах значительно меньше, использование данного алгоритма приведёт к большому числу ложноположительных срабатываний.

В работе [2] для решения проблемы перепутанных ракурсов в стереофильмах предлагается проводить простую сегментацию одного из ракурсов на передний и задний план и сравнивать средние значения диспаратности в этих областях. Описанный подход также не применим на практике при анализе стереоскопических фильмов, так как его точность сильно зависит от точности алгоритмов сегментации изображения, которые в большинстве случаев имеют много ложноположительных срабатываний, а также высокую вычислительную сложность.

В работе [3] представлен алгоритм, состоящий из двух частей. Первая часть метода основана на анализе областей открытия и заключается в следующем: осуществляется выделение границ объектов в изображении, и на основании распределения границ рядом с областями открытия вычисляется вероятность того, что данный кадр является левым или правым ракурсом. Если с помощью анализа областей открытия не удаётся распознать порядок ракурсов, то проводится анализ распределения диспаратности. Предполагается, что в карте диспаратности левого ракурса будет больше положительных значений, чем отрицательных, а в карте диспаратности правого ракурса – наоборот. Тогда моменты гистограммы карты диспаратности левого ракурса должны быть положительными, а моменты гистограммы карты диспаратности правого ракурса – отрицательными. На этом основана вторая часть рассматриваемого метода. Метод, предложенный в работе [3], имеет относительно низкую точность. При использовании рассмотренного метода для анализа стереофильмов было получено большое число ложноположительных срабатываний, что показало его практическую неприменимость. Также этот метод имеет высокую вычислительную сложность из-за использования трудоёмкого алгоритма, основанного на оптическом потоке, для вычисления карт диспаратности.

В работе [4] также используется подход, основанный на анализе областей открытия. Для обнаружения перепутанных ракурсов вычисляются центроиды карт областей открытия левого и правого ракурсов, и сравниваются значения горизонтальных координат центроидов. Использование на практике только одного критерия, основанного на анализе областей открытия, также нецелесообразно, так как этот критерий сильно зависит от качества построенных карт областей открытия, которые, в свою очередь, зависят от качества построенных карт диспаратности.

Данная работа является продолжением работы [5]. В предложенном методе поиска перепутанных ракурсов используется композиция пяти базовых алгоритмов-критериев, анализирующих:

1. перспективу;
2. «выпадающие» объекты;
3. распределение диспаратности;
4. области открытия в стереопаре;
5. области открытия/закрытия по движению.

Первые три критерия основаны на выполнении простых эвристик, то есть считается, что для анализируемой сцены выполнены определённые предположения о распределении диспаратности.

Критерий по анализу перспективы основан на предположении, что чем ближе объект к низу кадра, тем меньше его диспаратность в левом кадре. Критерий по анализу «выпадающих» объектов основан на том факте, что обычно объекты, на которые обращено внимание зрителей, являются «выпадающими», то есть имеют наименьшую диспаратность среди остальных объектов и, таким образом, окружены объектами с большей диспаратностью, а также находятся ближе к центру экрана. Критерий по анализу распределения диспаратности совпадает с аналогичным критерием, описанным в работе [3]. В критерии по анализу областей открытия в стереопаре в вычисленных картах областей открытия выделяются непрерывные отрезки, каждая точка которых принадлежит области открытия, и далее анализируются цветовые характеристики участков слева и справа от рассматриваемого отрезка. В критерии по анализу областей открытия/закрытия по движению для каждой точки области открытия/закрытия находится точка, которая перекрывает эту точку в другом кадре, и производится анализ диспаратности в треугольных областях рядом с рассматриваемыми точками.

В качестве результата метод, предложенный в работе [5], выдаёт значение, полученное путём взвешенного суммирования результатов работы компонент на рассматриваемой сцене. Если полученное значение больше нуля, то предполагается, что в рассматриваемой сцене присутствуют перепутанные ракурсы. С помощью данного метода было проведено исследование 105 различных стереофильмов, в 23 из которых было обнаружено 65 сцен с перепутанными ракурсами. Хотя точность метода по сравнению с аналогами была значительно улучшена, при анализе стереофильмов всё равно встречалось большое число ложноположительных срабатываний, что значительно усложняло и замедляло процесс анализа.

Предлагаемый метод

Предложенный метод поиска перепутанных ракурсов в стереофильмах основан на использовании 7 признаков. Первые пять признаков совпадают с признаками, описанными в работе [5]. Два остальных признака основаны на использовании свёрточных нейронных сетей для предсказания наличия перепутанных ракурсов в стереофильмах. Подробно нейросетевой подход описан в следующем

разделе. На данных признаках строится модель логистической регрессии/метода опорных векторов, результат работы которой и используется для определения вероятности наличия перепутанных ракурсов в стереофильмах.

Для сопоставления ракурсов и оценки движения используется блочный алгоритм [6]. Данный алгоритм для каждого блока в одном изображении находит наиболее похожий на него блок в другом изображении с четвертьпиксельной точностью. Найденные смещения блоков используются в качестве значений диспаратности при сопоставлении стереопары, векторов движения при оценке движения и формируют соответствующие карты. При этом в построенных картах могут присутствовать неверные значения из-за ошибок при сопоставлении блоков. Для исключения таких значений из рассмотрения алгоритмом к каждой построенной карте строится карта доверия по следующей формуле:

$$\text{conf}_i = \min(1 - a \times \text{lrc}_i, b \times \text{disp}_i),$$

lrc – карта несоответствий при сопоставлении ракурсов/оценке движения, построенная с помощью метода LRC (left-right consistency) [7],

disp – карта блочной дисперсии ракурса,

a, b – положительные вещественные коэффициенты,

i – индекс пикселя.

Значения каждого признака, в отличие от метода из работы [5], вычисляются для каждого кадра сцены вместо вычисления признаков по первому кадру сцены. Значения признаков для сцены вычисляются как средние значения признаков по всем кадрам сцены. Данный шаг позволяет избавиться от выбросов, возникающих в результате обработки неправильно вычисленных, в виду особенностей определённого кадра, сцены, карт диспаратности, векторов движения, областей открытия/закрытия, что встречается, например, при анализе высокодинамичных участков сцен.

Для улучшения работы признаков по анализу областей открытия/закрытия была использована фильтрация карт диспаратности и векторов движения с учётом структуры исходных изображений с помощью фильтра [8]. Данный шаг позволяет восстановить структуру рассматриваемых карт, тем самым улучшая качество построения карт областей открытия/закрытия по соответствующим картам диспаратности и векторов движения. При этом во время фильтрации учитываются карты доверия к исходным картам. Для этого фильтруемая карта поэлементно умножается на соответствующую ей карту доверия, а затем фильтруются с помощью фильтра [8]. Также фильтруется сама карта доверия. Далее производится поэлементное деление отфильтрованной карты на отфильтрованную карту доверия, что и является результатом фильтрации с учётом доверия. Пример построенных карт областей открытия с использованием и без использования фильтрации карт диспаратности представлен на рис. 1.



Рис. 1. Пример карты областей открытия (сверху), построенной по карте диспаратности без использования фильтрации [8], и карты областей открытия (снизу), построенной по карте диспаратности с использованием фильтрации [8]. Области открытия обозначены красным цветом. Применение фильтра [8] для фильтрации карт диспаратности помогает избавиться от большого числа ложноположительных срабатываний метода поиска областей открытия. Кадр из фильма «Мстители»

Также в предложенном методе при анализе сцены не учитываются кадры с постоянной диспаратностью и кадры с очень низкой яркостью. Для кадров с постоянной диспаратностью не имеет смысла проводить анализ на наличие перепутанных ракурсов, а при анализе кадров с очень низкой яркостью часто возникают ошибки при вычислении карт диспаратности и векторов движения. При этом возникающий дискомфорт при просмотре «тёмных» кадров с перепутанными ракурсами значительно меньше, чем при просмотре «ярких» кадров [9], что в целом позволяет не учитывать такие кадры при анализе. Для исключения из рассмотрения кадров с постоянной диспаратностью строится взвешенная гистограмма карты диспаратности, где в качестве весов выступают значения доверия к рассматриваемой карте. В построенной гистограмме отбрасываются 5% максимальных и 5% минимальных значений для исключения выбросов, и вычисляется стандартное отклонение диспаратности. Кадры с низким стандартным отклонением диспаратности не учитываются. Для исключения из рассмотрения кадров с очень низкой яркостью строится гистограмма яркости левого ракурса. В построенной гистограмме отбрасываются 10% максимальных значений и вычисляется сред-

нее значение яркости. Кадры с низким средним значением яркости не учитываются.

Нейросетевой подход к поиску перепутанных ракурсов в стереофильмах

Архитектура нейронных сетей. Для предсказания перепутанных ракурсов с помощью свёрточных нейронных сетей были рассмотрены модели, использующие в качестве входных данных левый ракурс и построенную для него карту диспаратности, а также только карту диспаратности. При этом карта диспаратности дополнительно фильтруется с помощью метода [8] для восстановления структуры с учётом информации из исходного изображения. Дополнительно для каждого случая входных данных были рассмотрены две архитектуры свёрточных нейронных сетей.

Первая архитектура нейронных сетей более простая, она представляет стек свёрточных слоёв размером 3x3, имеющих шаг 1, за которыми следуют слои субдискретизации с выбором максимума (max-pooling слои) размером 2x2, имеющие шаг 2. После данного стека слоёв следует слой субдискретизации с выбором среднего (average pooling слой), усредняющий значения карт признаков по пространственным координатам, за которым следует два полносвязных слоя. Во второй архитектуре дополнительно используются свёрточные слои размером 1x1 для понижения размерности и увеличения глубины сети. Данные архитектуры для каждого случая входных данных представлены на рис. 2.

Обучение. Для обучения свёрточных нейронных сетей была сгенерирована тренировочная выборка, состоящая из изображений и соответствующих им карт диспаратности. Данные генерировались по каждому десятому кадру шести стереофильмов. Всего было подготовлено 113 тыс. примеров.

Размерность входных данных обучаемых нейронных сетей – 224x400. Подаваемые в сеть изображения и карты диспаратности приводятся к этому размеру, а их значения нормализуются. В случае карт диспаратности каждая карта линейно масштабируется так, чтобы результирующая карта имела нулевое среднее значение и единичную норму. Во время обучения целевая метка выбирается случайно. Если выбрана метка, соответствующая перепутанным ракурсам, то знак значений карты диспаратности дополнительно меняется на обратный, моделируя тем самым перепутанные ракурсы. Выходной слой сети имеет два нейрона и предсказывает вероятность наличия/отсутствия перепутанных ракурсов для кадра стереофильма после применения к значениям данного слоя softmax-функции:

$$p_j = \frac{e^{z_j}}{\sum_{j=1}^2 e^{z_j}}, \quad j=1,2.$$

Все свёрточные слои в сети имеют в качестве функции активации функцию ReLU, а полносвязные слои – линейную функцию.

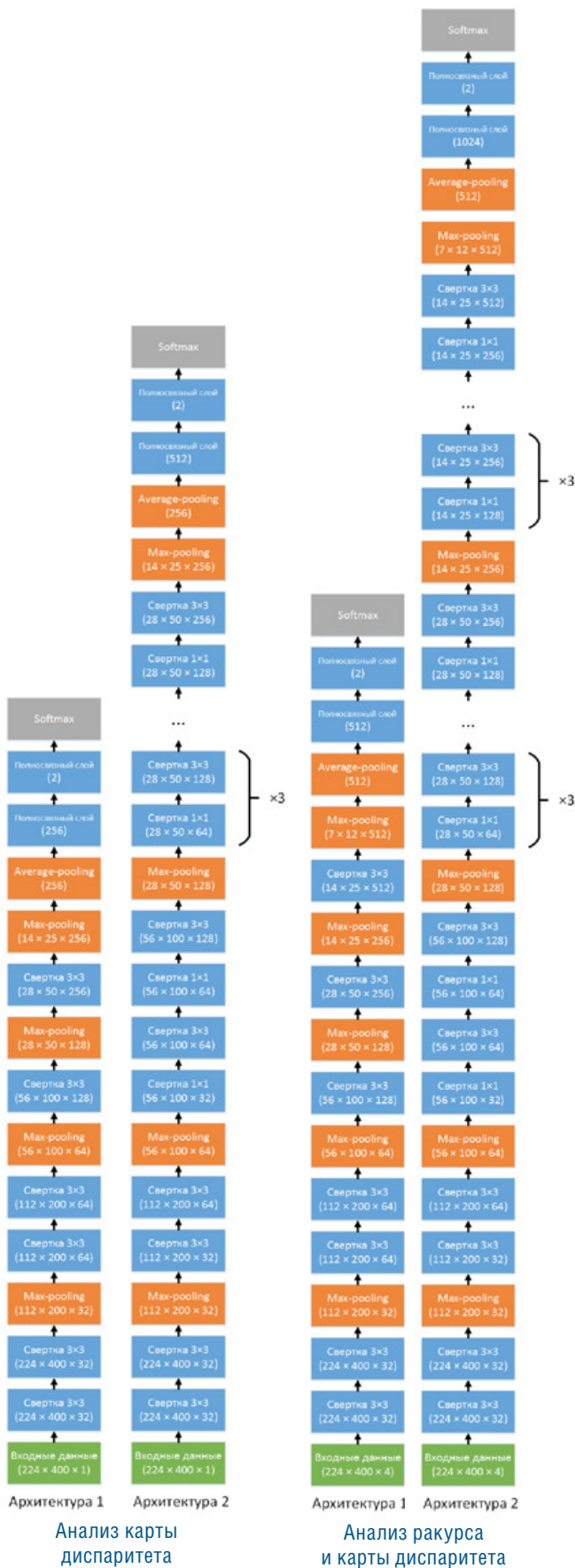


Рис. 2. Рассматриваемые архитектуры свёрточных нейронных сетей для определения порядка ракурсов в стереоскопическом видео

В качестве функции стоимости, оптимизируемой во время обучения, используется логарифмическая функция стоимости:

$$-\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i \ln p_{i1} + (1-y_i) \ln p_{i2})$$

где N – число примеров, используемых на каждой итерации обучения, y_i –метка о наличии/отсутствии перепутанных ракурсов в примере i , p_{ij} –выходные значения свёрточной нейронной сети для примера i . Дополнительно для предотвращения переобучения используется L_2 – регуляризация с коэффициентом 0.0005 для всех весов в сети. Также для предотвращения переобучения используются слои dropout с коэффициентом 0.5 перед каждым полносвязным слоем, батч-нормализация [10] после каждого свёрточного слоя (что также увеличивает скорость сходимости), увеличение объёма выборки за счёт применения следующих преобразований:

- случайное масштабирование и сдвиг исходных изображений и карт диспаратности до 10% от входной размерности;
- случайное зеркальное отражение исходных изображений и карт диспаратности;
- случайное изменение яркости и насыщенности исходного изображения.

Обучение проводилось в течение 180 тыс. итераций. Для оптимизации функции был использован метод стохастического градиентного спуска. Были использованы следующие параметры: число примеров на каждой итерации обучения – 32, момент – 0.9. Коэффициент скорости обучения в начале составлял 10^{-2} , затем понижался до 10^{-3} на 80000 итерации и до 10^{-4} на 160000 итерации.

Экспериментальная оценка

Для обучения и тестирования разработанного метода поиска перепутанных ракурсов в стереофильмах были подготовлены тренировочная, валидационная (для выбора архитектуры нейронной сети) и тестовая выборки. Тренировочная выборка состояла из 1000 сцен по 30 кадров, а валидационная и тестовая выборки – из 300 сцен по 30 кадров. В половине случайных сцен выборок порядок ракурсов был искусственно изменён, в остальных сценах порядок ракурсов соблюден.

В качестве количественной оценки качества классификации был выбран показатель AUCROC– площадь, ограниченная ROC-кривой и осью доли ложноположительных срабатываний. Чем выше показатель AUC, тем выше качество классификации.

На валидационной выборке были проверены различные архитектуры свёрточных нейронных сетей. Были получены следующие показатели AUCROC.

При использовании левого ракурса и карты диспаратности в качестве входных данных: архитектура свёрточ-

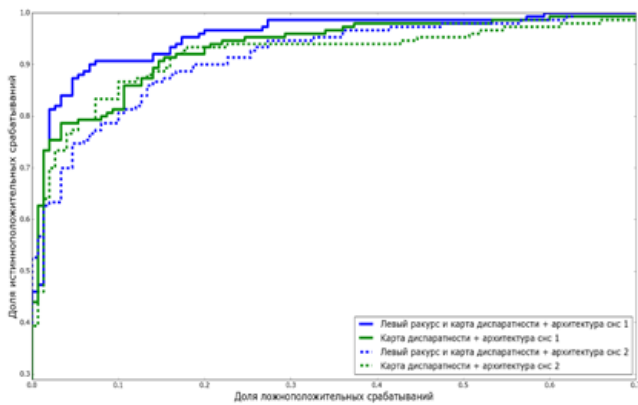


Рис. 3. ROC-кривые для каждой обученной нейронной сети, построенные на валидационной выборке

ной нейронной сети 1 – 0.9671; архитектура свёрточной нейронной сети 2 – 0.9395.

При использовании карты диспаратности в качестве входных данных: архитектура свёрточной нейронной сети 1 – 0.9499; архитектура свёрточной нейронной сети 2 – 0.9362.

На рис. 3 изображены ROC-кривые для каждой обученной нейронной сети: нейронные сети с более простой архитектурой обладают более высоким качеством классификации, чем более глубокие нейронные сети.

Вероятно, сложные модели переобучаются и поэтому на новой выборке, состоящей из данных, взятых из других стереофильмов, показывают результаты несколько хуже, чем более простые модели.

На обучающей выборке были построены модели логистической регрессии и метода опорных векторов. Оптимальные по показателю AUCROC параметры алгоритмов были подобраны с помощью кросс-валидации по пяти блокам. Качество классификации построенных моделей было протестировано на тестовой выборке. Также было проведено сравнение с предыдущими версиями метода поиска перепутанных ракурсов в стереофильмах [3,5]. Показатель AUCROC для рассматриваемых методов на тестовой выборке:

- Использование логистической регрессии – 0.9938;
- Использование метода опорных векторов – 0.9942;
- Метод из работы [5] – 0.9619;
- Метод из работы [3] – 0.9099.

Соответствующие ROC-кривые показаны на рис. 4.

Заключение

В работе представлен новый метод поиска перепутанных ракурсов в стереофильмах, обладающий высокой точностью. Высокая точность достигается за счёт использования результатов работы свёрточных нейронных сетей в качестве новых признаков для предсказания перепутанных ракурсов. На тестовом наборе из 300 сцен показатель AUCROC достиг значения 0.9942 при использовании метода опорных векторов для вычисления фи-

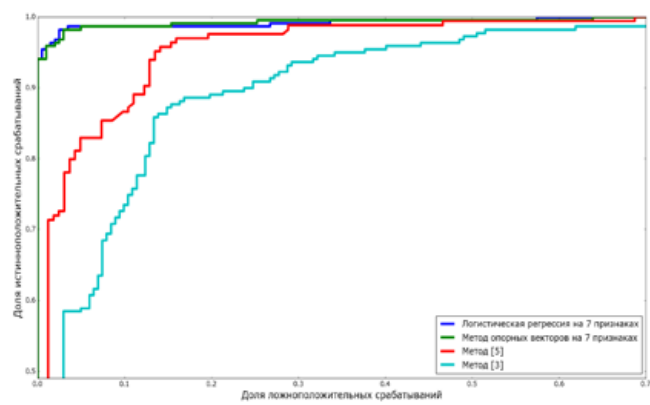
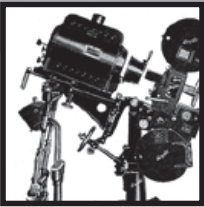


Рис. 4. ROC-кривые различных методов поиска перепутанных ракурсов в стереофильмах, построенные на тестовой выборке

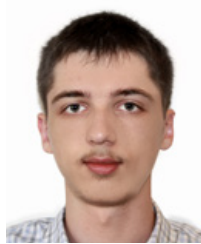
нальной вероятности наличия перепутанных ракурсов в стереофильмах. ■

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. *Knee M.* Getting machines to watch 3d for you / SMPTE Motion Imaging Journal. – 2012. – Т. 121. – №. 3. – С. 52–58.
2. *Lee J., Jung C., Kim C., and Said A.* Content-based pseudoscopic view detection / Journal of Signal Processing Systems. – 2012. – Т. 68. – №. 2. – С. 261–271.
3. *Shestov A., Voronov A., Vatolin D.* Detection of swapped views in stereo image / 22st GraphiCon International Conference on Computer Graphics and Vision. – 2012. – С. 23–27.
4. *Bouchard J., Nazzari Y., and Clark J.J.* Half-occluded regions and detection of pseudoscopy / International Conference on 3D Vision (3DV). – 2015. – С. 215–223.
5. *Bokov A., Lavrushkin S., Erofeev M., Vatolin D., and Fedorov A.* Towards fully automatic channel mismatch detection and discomfort prediction in s3d video / International Conference on 3D Imaging (IC3D). – 2016. – С. 1–7.
6. *Simonyan K. et al.* Fast video super-resolution via classification / Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing. – 2008. – С. 349–352.
7. *Egnal G., Wildes R.P.* Detecting binocular half-occlusions: Empirical comparisons of five approaches / IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2002. – Т. 24. – №. 8. – С. 1127–1133.
8. *Min D., Choi S., Lu J., Ham B., Sohn K., and Do M.N.* Fast global image smoothing based on weighted least squares / IEEE Transactions on Image Processing. – 2014. – Т. 23. – №. 12. – С. 5638–5653.
9. *Ватолін Д.С., Лаврушкин С.В.* Исследование и предсказание заметности перепутанных ракурсов в стереовидео / Вестник Московского Университета, серия 15, Вычислительная Математика и Кибернетика. – 2016. – № 4. – С. 40–46.
10. *Ioffe S., Szegedy C.* Batch Normalization: Accelerating Deep Network Training by Reducing Internal Covariate Shift / Proceedings of the 32nd International Conference on Machine Learning (ICML-15). – 2015. – С. 448–456.



АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОСТРОЕНИЯ КАРТ ПЕРЕМОНТАЖА разных версий фильма



И.А. Молодецких, ivan.molodetskikh@graphics.cs.msu.ru, студент, Д.С. Ватолин, dmitriy@graphics.cs.msu.ru, к.ф.-м.н., лаборатория компьютерной графики и мультимедиа МГУ им. М.В. Ломоносова, РФ

Аннотация

Некоторые фильмы перевыпускаются в двух и более версиях. Одна из частых причин — сокращение фильма для показа в кинотеатрах с последующим выпуском как театральной (сокращённой), так и режиссёрской (оригинальной, расширенной) версий. Автоматическое нахождение различий в монтаже между разными версиями фильма затрудняется возможными изменениями цветовой гаммы, соотношения сторон, сокращением или увеличением длины отдельных сцен, добавлением или удалением объектов в сценах. Подобные трудности не позволяют применить существующие подходы напрямую к построению карт перемонтажа. В данной работе описан алгоритм полностью автоматического построения карты перемонтажа между двумя версиями фильма.

Ключевые слова: карты перемонтажа, сопоставление видео, режиссёрская версия.

Введение

Нередко фильм сокращается для театрального показа, и впоследствии выпускаются как театральная, так и режиссёрская (расширенная) версии. Между разными версиями фильма встречаются такие изменения, как:

- Удаление отдельных менее важных для сюжета сцен;
- Сокращение сцен на несколько кадров с начала или с конца;
- Изменение порядка сцен;
- Добавление новых сцен;

AUTOMATIC EDITING MAP CONSTRUCTION TO DETECT DIFFERENCES BETWEEN FILM VERSIONS

I. Molodetskikh, ivan.molodetskikh@graphics.cs.msu.ru, student, D. Vatolin, dmitriy@graphics.cs.msu.ru, Ph.D, Lomonosov Moscow State University, Russia

Abstract

Some movies are released in two or more versions. One of the frequent causes is shrinking the film for theatrical showcase with subsequent release of both the theatrical (shrunk) cut and the director's (original, extended) cut. Automatic editing difference detection is complicated by potential changes to color gamut, aspect ratio, reduced or increased length of individual scenes, object addition or removal. These difficulties make it impossible to directly apply existing approaches to editing map construction. We propose an algorithm for fully automatic construction of an editing map of two film versions.

Keywords: editing maps, video matching, director's cut, frame-level accuracy.

- Цветокоррекция кадров;
- Изменение соотношения сторон;
- Частичная перерисовка существующих сцен, например, удаление или добавление отдельных объектов в сцене, замена заднего плана.

Цель данной работы — создание алгоритма полностью автоматического построения карты перемонтажа между двумя версиями фильма, устойчивого к возможным изменениям. Алгоритм должен корректно распознавать добавленные, удалённые и переставленные сцены

и распознавать незначительно изменённые сцены как совпадающие.

В качестве областей применения можно выделить анализ различий между разными версиями фильма, анализ архивных копий фильмов, контроль показа рекламы на телеканалах.

Исследования в данной области

Сопоставление видео – активно изучаемая область со множеством применений (устранение дубликатов в системах хранения данных; обнаружение материалов, нарушающих авторские права; контроль за показом рекламы в телевизионных сетях) [6].

Во многих методах сопоставления для увеличения точности применяется разбиение видео на сцены. Для этого существует несколько подходов [10]. В работе [4] описан метод, использующий значения яркости каждого пикселя. В статье [1] каждый кадр делится на некоторое число фрагментов, и затем используется средняя яркость пикселей в каждом фрагменте. Также существуют алгоритмы, вычисляющие и применяющие данные о границах объектов [11] или движении объектов [2] в кадре. Эти подходы, как правило, исходят из предположения, что резкое изменение некоторого параметра (например, резкий скачок средней яркости кадра) является признаком смены сцены.

При сопоставлении видео, как правило, используются признаки как отдельных кадров, так и видео в целом. Такой подход повышает устойчивость к искажениям и скорость работы и уменьшает затраты памяти. В качестве признаков кадров могут выступать средние яркости областей кадра [5] или гистограммы цветовых каналов [7]. Авторы [12] предлагают вычислять и использовать перцептивные хеши кадров. Как особенности сцен или видео в целом применимы длины и углы векторов движения объектов в кадрах видео [8], длины сцен и изменения в средней яркости между сценами [13], гистограммы средней яркости [9]. В данных подходах между двумя видеофрагментами строится корреляция по некоторым признакам, и в случае достаточного соответствия видеофрагменты помечаются как совпадающие.

Предложенный алгоритм

Поставим задачу формально. Даны две последовательности кадров $\{a_i\}_{i=1}^{N^a}$ и $\{b_i\}_{i=1}^{N^b}$ длиной N^a и N^b кадров соответственно. Необходимо найти множество индексов I наибольшей мощности и отображение $F: I \rightarrow N$ такое, что для каждого индекса $i \in I$ кадр a_i первой последовательности соответствует кадру $b_{F(i)}$ второй последовательности, а каждый кадр a_j , $j \notin I$ не соответствует никакому из кадров b_i . Построение такого множества и отображения мы проведём в несколько этапов.

Разбиение на сцены

На первом этапе обе видеопоследовательности разбиваются на сцены. Для этого вычисляется средняя яр-

кость каждого кадра: $\{I_i\}_{i=1}^n$. Затем вычисляются разности между последовательными элементами I_i , образуя новую последовательность $\{d_i\}_{i=1}^{n-1}$:

$$d_i = I_{i+1} - I_i$$

К полученной последовательности применяется высокочастотный фильтр. Множество индексов кадров, соответствующих границам сцен, определяется как $\{i \mid d_{i-1} > \theta\}$, где $\theta=1$ была найдена экспериментально. Таким образом, мы получили множества сцен $\{A\}$ и $\{B\}$ последовательностей a_i и b_i .

Сопоставление сцен

На следующем этапе строится сопоставление между сценами из $\{A\}$ и $\{B\}$. Из множества $\{B\}$ выбирается по 7 последовательно идущих сцен (число сцен выбрано экспериментально), и во множестве происходит поиск последовательности сцен, схожей по длинам сцен и разностям средних яркостей между сценами с выбранной из множества $\{A\}$. Сравнение последовательностей сцен производится следующим образом: для каждой границы между сценами вычисляются стоимости сопоставления

$$\begin{aligned} \text{CostT}(p,q) &= (t_p - t_q)^2, \\ \text{CostL}(p,q) &= (I_p - I_q)^2, \end{aligned}$$

где t_p и t_q – время в секундах от начала последовательности сцен до границ i и соответственно, I_p и I_q – разности средних яркостей между сценами. Стоимость сопоставления последовательностей сцен:

$$\text{Cost} = w S_{\text{CostT}}^2 + S_{\text{CostL}}^2,$$

где S_{CostT} и S_{CostL} – стандартные отклонения значений CostT и CostL по всем границам сцен, $w=0.2997$ – вес, выбранный экспериментально.

Таким образом, строится первое приближение сопоставления между сценами. Затем каждая сцена из $\{A\}$, не сопоставленная на предыдущем шаге (в $\{B\}$ не нашлось последовательности сцен, стоимость сопоставления с которой была меньше порогового значения), находится в $\{B\}$ при помощи гистограмм сцен [1]: каждый кадр S_i сцены S разбивается на M непересекающихся областей, и в каждой области вычисляется средняя яркость. По полученным значениям строится гистограмма кадра $\text{Hist}(S_i)$ с M корзинами. Корзины гистограммы сцены $\text{SceneHist}(S)$ содержат усреднённые значения корзин гистограмм кадров сцены:

$$\text{SceneHist}_j(S) = \frac{1}{|S|} \sum_{i=1}^{|S|} \text{Hist}_j(S_i),$$

Сравнение гистограмм сцен производится с помощью коэффициента Жаккара:

$$J(\text{HistA}, \text{HistB}) = \frac{\sum_i \min(\text{HistA}_i, \text{HistB}_i)}{\sum_i \max(\text{HistA}_i, \text{HistB}_i)}.$$

Покадровое выравнивание

На третьем этапе выполняется покадровое выравнивание сопоставленных сцен. Задачу покадрового выравнивания можно определить следующим образом. Пусть сцена $A = \{a_k, a_{k+1}, \dots, a_{k+|A|}\}$ одной видеопоследовательности соответствует сцене $B = \{b_m, b_{m+1}, \dots, b_{m+|B|}\}$ второй видеопоследовательности. Так как при перемонтаже могут быть обрезаны края сцен, длины A и B могут отличаться, и i -й кадр A не обязательно соответствует i -му кадру B . Задача покадрового выравнивания – найти такой сдвиг s , что для $i \in [\max(0, s), \min(|A|, |B| - \max(0, s))]$ кадр соответствует кадру b_{m+i+s} .

Оптимальное выравнивание строится с использованием перцептивных хешей кадров на основе яркостей блоков кадра [12]. Хеш H_j кадра S_i вычисляется следующим образом: кадр разбивается на M непересекающихся блоков, в каждом из которых считается средняя яркость: $\{L_1, L_2, \dots, L_M\}$. Затем находится медиана полученного множества L_d и сравнивается с каждым из значений, образуя итоговый хеш кадра:

$$H_j(S_i) = \begin{cases} 0, L_j < L_d, \\ 1, L_j \geq L_d, \end{cases} \quad j=1..M$$

Наилучший сдвиг s – минимизирующий суммарное расстояние между хешами кадров:

$$s = \operatorname{argmin}_s \sum_{i=\max(0,s)}^{\min(|A|, |B| - \max(0,s))} \rho(H(a_{k+i}), H(b_{m+i+s}))$$

$\rho(H(a), H(b))$ – расстояние Хэмминга.

Результаты

Для тестирования алгоритма были составлены две выборки из короткометражного фильма «Синтел» (2010, режиссёр Колин Леви), каждая из которых состояла из 80 последовательностей. Для этого фильм разбивался на сцены, у некоторых сцен с начала и с конца обрезалось случайное количество кадров, и из результирующей последовательности изменённых сцен бралась случайная перестановка фрагментов длиной от 1 до 20 сцен. Во второй выборке к видео дополнительно применялись случайные искажения, такие как увеличение яркости на 8%, изменение цветового оттенка, обрезание кадра со всех сторон на 5%, размытие кадра.

На вход алгоритма подавалась каждая из тестовых последовательностей и фильм целиком. Затем вывод алгоритма (информация, какому кадру фильма соответствует каждый кадр тестовой последовательности) сравнивалась с исходной, использованной при создании последовательности. Кадры разбивались на корректно сопоставленные (алгоритм показал, что кадр присутствует в исходном фильме, и правильно указал исходный кадр), некорректно сопоставленные (алгоритм показал,

что кадр присутствует в исходном фильме, но исходный кадр был указан неправильно), и не сопоставленные (алгоритм показал, что кадр в исходном фильме отсутствует).

Оценку результатов работы алгоритма на первой и второй выборках можно видеть на рис. 1.

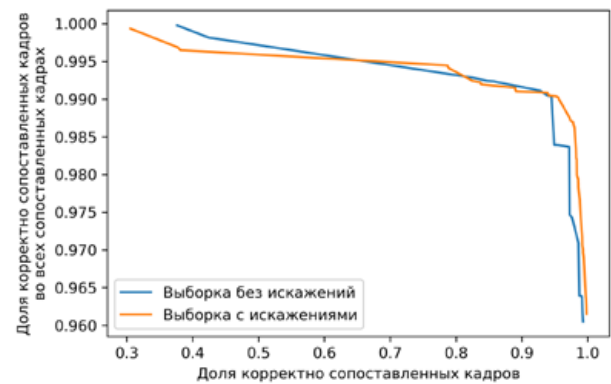


Рис. 1. Результат работы алгоритма на тестовых выборках

Для визуализации сопоставления, найденного алгоритмом, была создана страница с интерактивной картой перемонтажа (пример на рис. 2). Здесь можно видеть разбиение двух видеопоследовательностей на фрагменты разных типов. Фрагменты тёмно-зелёного цвета – совпадающие между двумя последовательностями. Фрагменты светло-зелёного цвета – присутствующие в одной из видеопоследовательностей, но отсутствующие в другой. Фрагменты светло-синего цвета – присутствующие в обеих последовательностях, но переставленные в одной относительно другой. При наведении курсора на фрагмент отображается информация о фрагменте (временные метки начала и конца), а также подсвечивается соответствующий фрагмент из другой видеопоследовательности. Также карту перемонтажа можно увеличивать, чтобы детально просмотреть конкретное место. Ниже в визуализацию интегрированы сами видеопоследовательности, и при нажатии на фрагмент начинается их проигрывш с места, соответствующего началу данного фрагмента.

Рассмотрим некоторые примеры построенных карт перемонтажа. На рис. 3 можно видеть карту перемонтажа между театральной и режиссёрской версиями фильма «Аватар» (2009, реж. Джеймс Кэмерон). В режиссёрской версии добавлено несколько фрагментов на протяжении фильма, а также переставлено несколько сцен в начале и в середине фильма.

На рис. 4 изображена карта перемонтажа между режиссёрской и расширенной версиями фильма «Хранители» (2009, реж. Зак Снайдер). На данных примерах алгоритм даёт хорошие результаты благодаря высокому качеству изображения и отсутствию различий в яркости и области кадра между версиями. Можно видеть, что в режиссёрской версии добавлено несколько новых фрагментов.

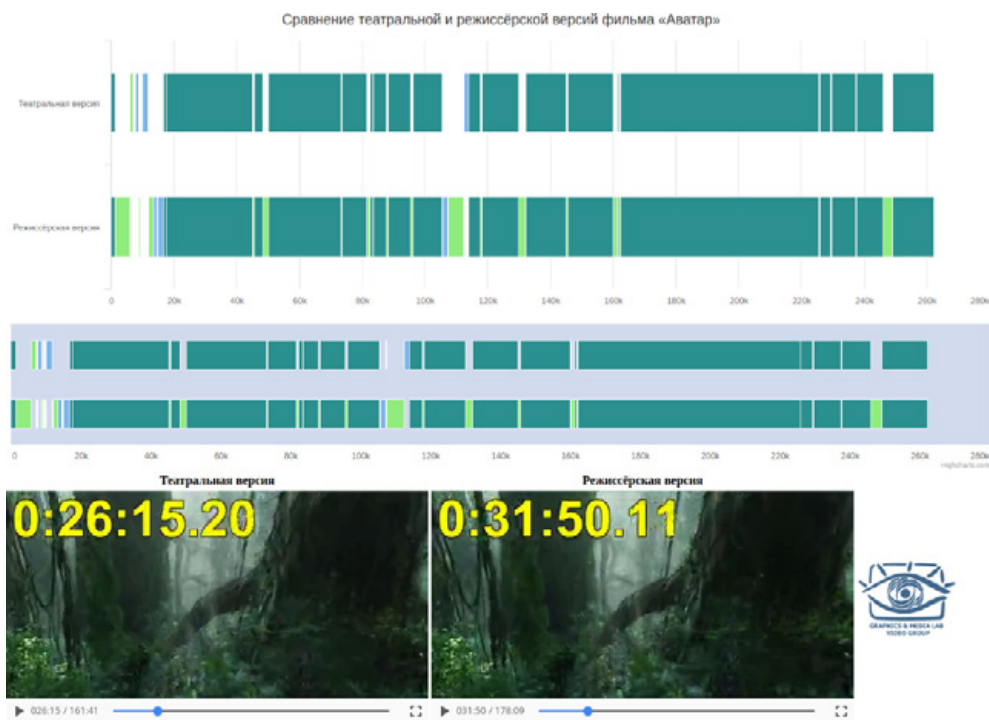


Рис. 2. Интерактивная визуализация карты перемонтажа

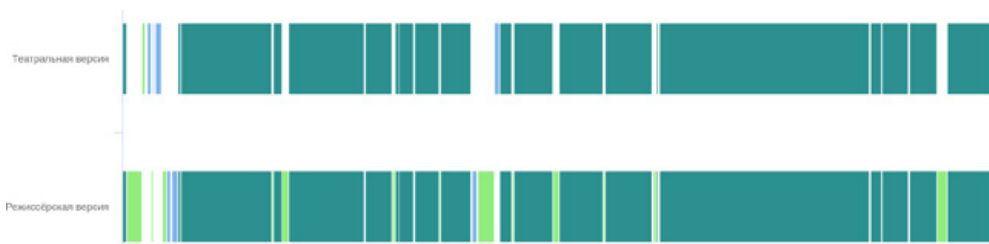


Рис. 3. Карта перемонтажа фильма «Аватар»



Рис. 4. Карта перемонтажа фильма «Хранители»

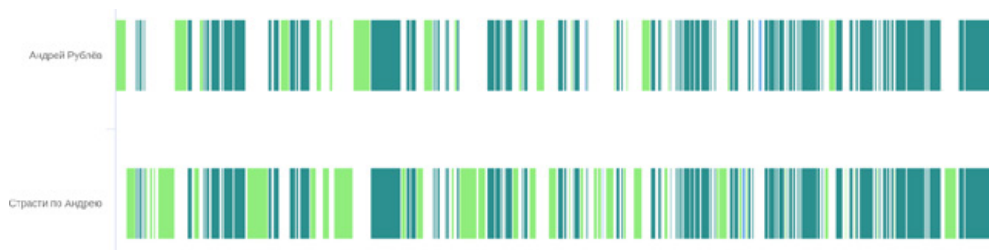


Рис. 5. Карта перемонтажа фильма «Андрей Рублёв»

На рис. 5 приведена карта перемонтажа фильма «Андрей Рублёв» (1966, реж. Андрей Тарковский). Это – сложный случай для алгоритма, так как в одной из версий присутствуют постоянные скачки яркости; между верси-

ями яркости кадров неравномерно изменены (например, одна часть кадра становится ярче, а другая часть кадра – темнее), кроме того, качество записи не очень хорошее. Часть сцен сопоставляется неверно (алгоритм счи-

тает совпадающими кадры разных сцен), а часть кадров не сопоставляется при фактическом наличии в другой версии фильма. Сопоставление сильно фрагментировано, так как многие сцены в одной из версий обрезаны на несколько кадров. По результатам сопоставления десяти фильмов была получена статистика переставленных сцен (таблица 1).

Заключение

Предложен алгоритм автоматического сопоставления видеопоследовательностей для построения карт перемонтажа. Проведённое объективное тестирование показывает, что алгоритм корректно определяет пере-

ставленные и удалённые фрагменты, а также устойчив к изменениям, встречающимся между разными версиями фильмов. С помощью описанного алгоритма были построены карты перемонтажа нескольких фильмов, и в ходе анализа результатов были выявлены сложные случаи для алгоритма.

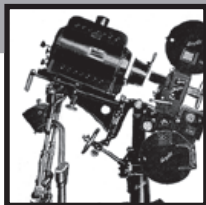
Планируемое развитие алгоритма включает улучшение работы на трудных местах, внутрикадровое сопоставление для выявления различий в сопоставленных сценах (таких как удаление объектов или перерисовка фона), разбиение фильма на семантические фрагменты для более глубокого анализа влияния перемонтажа на структуру фильма.

Табл. 1. Статистика по числу переставленных сцен между театральной и расширенной версиями фильмов

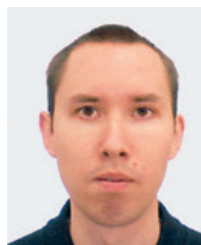
Фильм	Число переставленных сцен
«Царство небесное» (2005, реж. Ридли Скотт)	35
«Аватар» (2009, реж. Джеймс Кэмерон)	31
«Советник» (2013, реж. Ридли Скотт)	21
«Андрей Рублёв» (1966, реж. Андрей Тарковский)	15
«Человек-Паук 2» (2004, реж. Сэм Рэйми)	4
«Пикник у Висячей скалы» (1975, реж. Питер Уир)	2
«Чужой» (1979, реж. Ридли Скотт)	0
«Хранители» (2009, реж. Зак Снайдер) – между театральной и режиссёрской	0
«Хранители» (2009, реж. Зак Снайдер) – между режиссёрской и расширенной	0
«Вспомнить всё» (2012, реж. Лен Уайзман)	0

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Ahmed M., Karmouch A., Abu-Hakima S. Key frame extraction and indexing for multimedia databases / Vision Interface. – 1999. – Т. 99. – С. 1–1.
2. Bouthemy P., Gelgon M., Ganansia F. A unified approach to shot change detection and camera motion characterization / IEEE transactions on circuits and systems for video technology. – 1999. – Т. 9. – №. 7. – С. 1030–1044.
3. Chiu C.Y., Yang C.C., Chen C.S. Efficient and effective video copy detection based on spatiotemporal analysis / Multimedia, 2007. ISM 2007. Ninth IEEE International Symposium on. – IEEE, 2007. – С. 202–209.
4. Chung M.G., Kim H., Song S.M.H. A scene boundary detection method / Image Processing, 2000. Proceedings. 2000 International Conference on. – IEEE, 2000. – Т. 3. – С. 933–936.
5. Kim K.R., Jang W.D., Kim C.S. Frame-level matching of near duplicate videos based on ternary frame descriptor and iterative refinement / Image Processing (ICIP), 2015 IEEE International Conference on. – IEEE, 2015. – С. 31–35.
6. Liu J. et al. Near-duplicate video retrieval: Current research and future trends / ACM Computing Surveys (CSUR). – 2013. – Т. 45. – №. 4. – С. 44.
7. Nian F. et al. Efficient near-duplicate image detection with a local-based binary representation / Multimedia Tools and Applications. – 2016. – Т. 75. – №. 5. – С. 2435–2452.
8. Taşdemir K., Cetin A.E. Content-based video copy detection based on motion vectors estimated using a lower frame rate / Signal, Image and Video Processing. – 2014. – Т. 8. – №. 6. – С. 1049–1057.
9. Wu X., Hauptmann A.G., Ngo C.W. Practical elimination of near-duplicates from web video search / Proceedings of the 15th ACM international conference on Multimedia. – ACM, 2007. – С. 218–227.
10. Yuan J. et al. A formal study of shot boundary detection / IEEE transactions on circuits and systems for video technology. – 2007. – Т. 17. – №. 2. – С. 168–186.
11. Zabih R., Miller J., Mai K. Feature-based algorithms for detecting and classifying scene breaks. – Cornell University, 1995.
12. Zauner C. Implementation and benchmarking of perceptual image hash functions. – 2010.
13. Zobel J., Hoad T.C. Detection of video sequences using compact signatures / ACM Transactions on Information Systems (TOIS). – 2006. – Т. 24. – №. 1. – С. 1–50.



АСИММЕТРИЧНЫЕ ПРОФИЛИ в поверхностно-рельефных голограммах



А.Ф. Смык, smykholography@gmail.com, к.т.н., А.В. Шурыгин, магистр, ООО «Джеймс Ривер Бранч», РФ

Аннотация

Рассмотрены особенности формирования поверхностно-рельефных голограмм с асимметричным профилем и аппаратура для их изготовления. Показано, что они открывают новые возможности в поверхностно-рельефной голографии в отношении как повышения яркости изображения, так и защитных свойств. Приведён краткий обзор аппаратуры и результатов формирования асимметричных рельефов, а также фото голограмм.

Ключевые слова: асимметричные профили, поверхностно-рельефные голограммы, литограммы, трекограммы, символ под лупой, дот-матрикс, литограф.

1. Введение

Поверхностно-рельефные голограммы распространены больше других в наше время из-за высокой технологичности и дешевизны в массовом производстве. Основное их применение – обеспечение безопасности. При этом хорошо разработан инструментальный защитных элементов, производится широкая гамма материалов с самыми разными свойствами. Банкноты и паспорта, пластиковые карты и ламинированные пропуска, транспортные документы и билеты на массовые мероприятия, сертификаты и официальные бумаги давно освоили тиснёную голографию.

Формирование изображения в таких голограммах происходит за счёт дифракции падающей световой волны на поверхностном рельефе. Во многих случаях рельеф представляет собой систему полос примерно одной высоты с частотой от 10 до 2000 линий на мм. Если полосы параллельны, в информационных дифракционных порядках восстанавливается изображение освещающего источника. Для точечного освещающего источника восстанавливается изображение светящейся точки. Если на

ASYMMETRIC PROFILES IN SURFACE-RELIEF HOLOGRAMS

A. Smyk, smykholography@gmail.com, Ph.D, A. Shurygin, master, Russia

Abstract

Surface-relief holograms are considered and devices for its origination described mostly as per those with asymmetrical relief profile. This kind of profiles opens new prospective for embossed holography both with the brightness increase and security. Photos of the key features and visual effects are presented.

Keywords: Asymmetric profiles, surface-relief holograms, lithograms, trekograms, letterlens, dot-matrix, lithograph.

голограмме записан объект сложной формы, ему соответствуют искажённые в плане голографические полосы. В отступлениях этих полос от регулярной структуры содержится вся информация об объекте, его форме, глубине, распределении коэффициента отражения по поверхности. При дифракции плоской волны на такой структуре, она приобретает искажения по амплитуде и фазе, которые соответствуют волне, рассеянной объектом на этапе записи. То есть, происходит восстановление изображения объекта.

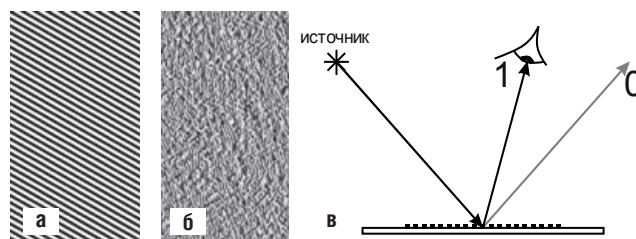


Рис. 1. Фото параллельных (а) и искажённых (б) полос и схемы с освещающими и дифрагированными пучками (в)

Характер дифракции на голографических полосах зависит и от формы полосы в поперечном её сечении. Если голограмма записывается при интерференции монохроматических световых волн, форма профиля полосы синусоидальна. Если же голограмма записывается, например, электронным лучом – профиль полосы близок к прямоугольному. Проявление голограммы вносит свои искажения в форму профиля. Так, синусоидальные полосы могут приблизиться к прямоугольным, и наоборот. При дифракции монохроматической световой волны на строго синусоидальных полосах образуются три порядка дифракции – нулевой, первый и минус первый, равные по интенсивности. При освещении такой голограммы восстанавливается не одно, а несколько изображений объекта в разных порядках дифракции. Рассмотрим решётку, при прохождении которой амплитуда прошедшего пучка описывается функцией

$$A(x) = A_0(t_1 + t_2 \cos(kx)), \text{ где } k = \frac{2\pi}{d}$$

При дифракции на такой решётке Фурье амплитуда задаётся:

$$\tilde{A}(k_x) = A_0 \int_{-\frac{s}{2}}^{\frac{s}{2}} (t_1 + t_2 \cos(kx)) e^{-ik_x x} dx,$$

где s – длина решётки. Тогда при $s \rightarrow \infty$

$$\tilde{A}(k_x) = A_0 \delta(k_x) + A_1 \delta(k - k_x) + A_1 \delta(k + k_x)$$

Если освещающая волна содержит много длин волн (например, это белый свет), первый и минус первый порядки окрашены радужными цветами. Нулевой порядок – белый. Если частота полос не слишком велика, все три порядка почти совпадают, и радужная окраска изображений незаметна глазу. При отступлении формы полос от синусоидальной появляются высшие порядки дифракции (и дополнительные изображения), в случае прямоугольных полос их может быть очень много.

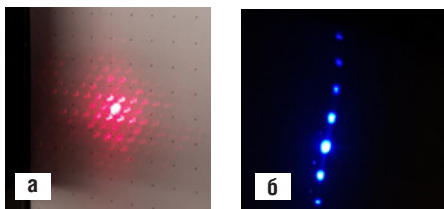


Рис. 2. Фото дифракционных порядков на почти синусоидальных (а) и прямоугольных полосах

Как правило, полезным считается один из порядков, в котором формируется основное изображение, все остальные рассматриваются как шум. Отношение интенсивности света в полезном порядке к интенсивности, освещающей голограмму волны, называют дифракционной эффективностью голограммы. Она определяет

яркость наблюдаемого изображения, одно из главных потребительских свойств голограммы.

Основной недостаток поверхностно-рельефных голограмм – ограниченная дифракционная эффективность, которая составляет, в лучшем случае, около 40% (для прямоугольного в поперечном сечении профиля полос) [5], и высокие требования к освещению. На практике это означает, что для наблюдения яркого изображения нужны источники с малым угловым размером. Солнце, в этом смысле, близко к идеалу, но вполне годятся и множественные источники на потолках внутри зданий. Пожалуй, наихудший осветитель для голограмм – равномерно пасмурное небо. Голограмма восстанавливает множество изображений от различных его фрагментов, они накладываются друг на друга, уничтожая целостность образа. Отрицательный эффект тем заметнее, чем глубже изображение. Если же изображение вынесено вперёд плоскости голограммы, требования к источнику ещё жёстче.

Эффективный способ радикального увеличения дифракционной эффективности тонких решёток – переход к асимметричному профилю голографических полос. Такой профиль, помимо повышения дифракционной эффективности, даёт ещё и новые возможности синтеза защитных элементов, полезных с точки зрения неосведомлённой их идентификации, что способствует повышению эффективности использования защитных голограмм. Уверенная идентификация голограмм обычным человеком, не обладающим знаниями и аппаратурой, очень важна в защите распространённых голограмм. Асимметричные профили рельефа открывают и здесь новые перспективы, поскольку создаваемые с их помощью защитные признаки хорошо идентифицируются на интуитивном уровне, не требуют аппаратуры и не слишком чувствительны к условиям освещения.

2. Повышение яркости поверхностно-рельефных голограмм

2.1. Эшелетт

В оптике хорошо известен способ радикального увеличения дифракционной эффективности тонких решёток изменением формы профиля [1]. Так называемые эшелетты позволяют уменьшить дифракцию во все порядки, кроме одного, тем самым существенно подняв яркость в «полезном» порядке.

Идея увеличения эффективности представлена на рис. 3. Дифракционные полосы эшелетта имеют пилообразный треугольный профиль, причём угол наклона таков, что дифракционный максимум первого порядка совпадает с нулевым порядком, то есть, зеркальным отражением от наклонных граней треугольных призм, образующих решётку.

$$d \cdot \sin(\theta) = m \cdot \lambda$$

где d – период решётки, $\theta = \varphi_0 + \varphi_m$ – угол отклонения максимума, m – порядок максимума, λ – длина волны.

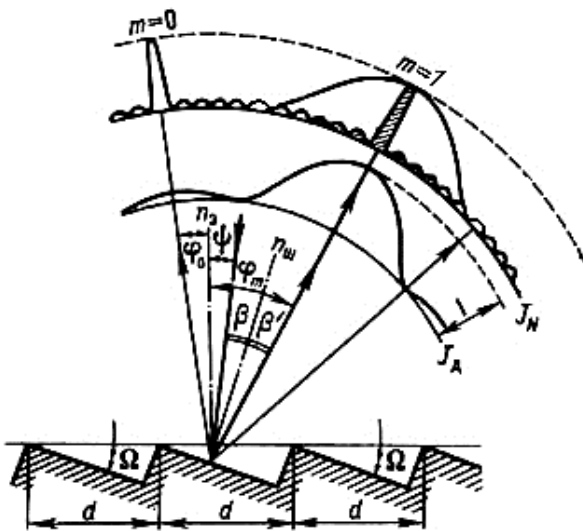


Рис. 3. Решётка типа эшелетт

Для выполнения описанного условия необходимо, чтобы $\theta=2 \cdot \Omega$.

Такие дифракционные решётки для спектральных приборов обычно изготавливались механической нарезкой. Этот метод не подходит для голограмм, поскольку им можно делать только полосы с регулярной структурой, а в голограммах искривления полос в плане и несут всю информацию об объекте. Если теперь в голограмме структуру полос в плане оставить прежней, а изменить только профиль полос, эффективность голограммы повысится, как и в случае с приборной дифракционной решёткой с регулярными штрихами. Этот метод относится к изображению, формируемому в первом дифракционном порядке, хотя бы он и совпадал с нулевым. Использование первого порядка предполагает достаточно высокую несущую пространственную частоту. В практике защитной голографии принято работать в районе пространственных частот около тысячи линий на мм, что соответствует углу дифракции первого порядка около 45° . Это и есть угол падения освещающего пучка на голограмму, привычный и удобный обычному человеку. Аппаратура для записи таких голограмм должна, следовательно, иметь разрешение существенно выше 0.4-0.5 мкм при глубине резкости порядка высоты профиля. С учётом возможных неровностей регистрирующей среды и погрешностей оборудования требования к глубине резкости возрастают до единиц мкм. Расчёты показывают, что такое сочетание глубины резкости и разрешения требует уменьшения длины волны ниже 0,3 мкм.

$$d = \frac{\pm \lambda}{2A^2}$$

где d – глубина резкости, λ – длина волны, A – числовая апертура;

$$R = \frac{1.22 \cdot \lambda}{2A}$$

где R – разрешение.

То есть, использование источников видимого света находится здесь на грани возможного. В то же время, электронно-лучевые приборы с длиной волны порядка 0.0002 мкм [7] вполне могут справиться с такой задачей. Это означает, что повышение дифракционной эффективности асимметризацией профиля и сохранение цвета в изображении возможно только в оптических системах записи УФ диапазона. Для этого годятся также различные электронно-лучевые литографы, литографические приставки к электронным микроскопам и т.п. Использование систем видимого диапазона проблематично.

2.2. Литограммы

Если не стремиться к высоким частотам, а ограничиться ахроматическими изображениями, то асимметричный рельеф позволит сформировать объёмное изображение и в нулевом порядке. По сути, этот метод отличается от предыдущего только более низкой пространственной частотой голографических полос и, таким образом, может быть реализован в системах видимого диапазона. На низкой частоте дифракционные порядки почти не разделяются, и начинает исчезать радужная окраска. Если снижать пространственную частоту полос до их полного исчезновения, приходим к разновидности голограмм, называемых киноформами, или голограммами нулевого порядка.

Идею метода подсказало одно любопытное наблюдение, описанное в начале XIX века Огюстеном Френелем [8]. Оказывается, если из световой волны «вырезать» слои, кратные целым длинам волн, то поведение волны остаётся почти таким же, как и у исходной волны. Схема формирования линзы Френеля показана на рис. 4.

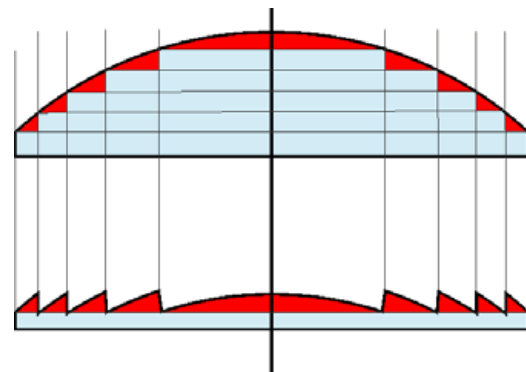


Рис. 4. Схема формирования линзы Френеля

Если теперь применить принцип формирования линзы Френеля к произвольному профилю, то оказывается, что восстанавливается объектная волна с небольшими искажениями. Зрительно это воспринимается так, что поведение блика (отражения нулевого порядка) на поверхности реального объекта и объекта, «нашинкованного» по принципу линзы Френеля, очень похожи. Помимо восстановления объектной волны здесь приобретают особое значение и психологические факторы восприятия объёма.

Зрение человека формирует стереообраз в двух случаях [3]:

1) *бинокулярное зрение*, когда каждый глаз видит своё изображение, и на этих изображениях имеются точки с окрестностями сходной фактуры, совмещение которых требует сведения лучей зрения под разными углами - чем меньше угол, тем дальше кажется точка:

$$L = 0.5 B \operatorname{tg}(d - 0.5U) \quad (1)$$

где L – удаление, B – бинокулярная база, U – угол сведения;

2) *кинематическое восприятие*, когда части изображения перемещаются по сетчатке с разными коллинеарными скоростями в одном направлении, и чем быстрее движется фрагмент, тем ближе он воспринимается:

$$L/L' = \operatorname{tg} U' / \operatorname{tg} U \quad (2)$$

где L, L' – удаления фрагментов, U, U' – их угловые перемещения. При совмещении обоих механизмов восприятия стереоэффект усиливается. Более сложные механизмы связаны с анализом загроаживания идентифицированных частей изображения и с профессиональными навыками, такими, как типичные угловые размеры известных предметов.

Задействуется при этом как бинокулярное зрение, так и кинематическое восприятие, и эффект экранирования. Причём, если толщина слоёв существенно больше длины волны, то ей не надо быть кратной длине волны. В таком случае количество слоёв определяется из желаемой воспринимаемой глубины изображения и может составлять сотни и даже тысячи. Объект воспринимается как объёмный, тогда как реальная глубина рельефа составляет доли микрона.



Рис. 5. Пример результата записи Лито. Реальная глубина рельефа – 0.3 мкм, кажущаяся – 4-5 мм

Данные для литограмм готовятся в виде 3D модели объекта, и затем эта модель преобразуется в рельефные участки, которые последовательно записываются на носитель.

2.3. Трекограммы

Трекограммы также используют оба механизма стереоскопического восприятия объёма: бинокулярный и кинематический. Однако изображение в них формируется поточно. Каждой точке объекта соответствует ряд концентрических в плане окружностей, а воспринимаемая глубина точки определяется радиусом этих окружностей. Профиль поперечного сечения окружностей может быть как симметричным, так и асимметричным. В первом случае формируется два изображения каждой точки: одно воспринимается расположенным за плоскостью голограммы, другое – перед плоскостью.

Наиболее часто раньше использовались тороидальные профили с полуокружностью в поперечном сечении [4,3].

Пример трекограммы приведён на рис. 6,а и 6,б.

Изображение состоит как бы из отдельных точек, однако вполне реально сформировать изображения и со сплошной заливкой. Точечная структура изображения остаётся заметной, размер точки определяется шириной тороидальной канавки. Её уменьшение ведёт к потере ахроматичности, что, впрочем, можно использовать для получения радужно окрашенных изображений. Дальнейшее развитие подхода связано с получением динамически изменяющихся изображений, содержащих сплошные яркие области, как показано на рис. 6,в. Аналогичным способом можно добиться эффекта 2D/3D, заключающегося в изменении изображения при изменении угла освещения. Данный метод позволяет получить ахроматические изображения с некоторой, слегка ограниченной, возможностью передачи текстур и полутонов.

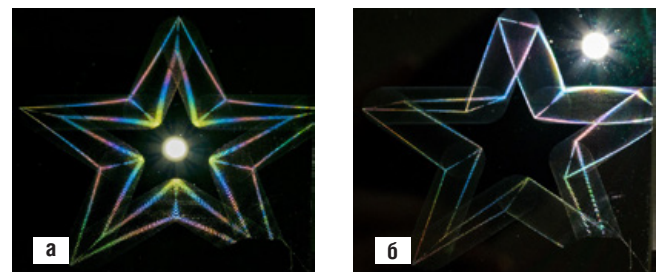


Рис. 6. Примеры трекограмм

2.4. «Кристалл»

В голограммах с условным наименованием «кристалл» используется только кинематическое восприятие объёма. Идеино они представляют собой комбинацию подходов литограмм и трекограмм. В отличие от

литограмм, профиль голограммы не представляет «нарезку» профиля объекта. А отличие от трекограмм состоит в отказе от поточечного формирования изображения. «Кристалл» использует управляемое движение блика по поверхности голограммы при её наклоне по отношению к освещающему источнику, то есть кинематическое восприятие. Управление осуществляется одновременным изменением пространственной частоты несущих низкочастотных полос и их азимутальной ориентации. Блики на стенках канавок перемещаются по изолиниям при изменении угла освещения. А сместить их в ту или другую сторону, т.е. искривить изолинию можно изменением частоты или азимута несущих полос. В зависимости от типа изолинии можно формировать различные типы голограмм «кристалл». Можно формировать блик в виде линии равных высот исходного профиля объекта – изогипсы, как показано на рис. 7.



Рис. 7. «Кристалл» – изогипса



Рис. 8. «Кристалл» – линии одинакового градиента профиля

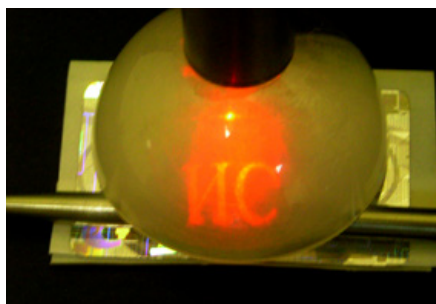
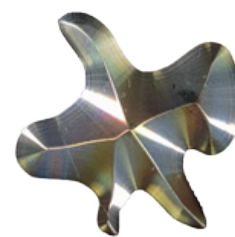


Рис. 9. Скрытое изображение – буквы «ИС» на полусферическом экране ридера. На противоположной стороне экрана восстанавливается такое же, но зеркальное изображение, формируемое минус первым порядком дифракции



Рис. 10. Асимметричные скрытые изображения. Пятно посередине – нулевой порядок дифракции

Или в виде линии одинакового градиента профиля 3D модели – рис. 8. Увеличивая частоту канавок, можно добавлять радужную окраску, а, сделав профиль асимметричным, получить увеличение яркости и больше вариантов формирования динамических изображений.

Голограммы «кристалл», менее чем литограммы, чувствительны к искажениям формы рельефа при массовом производстве, и потому технологичнее.

Все четыре рассмотренных здесь направления повышения яркости поверхностно-рельефных голограмм путём модификации профиля рельефов (эшелетт, литографические рельефы, трекограммы, голограммы «кристалл») предполагают использование нулевого порядка дифракции, а, следовательно, модификации профиля полосы. В первых двух случаях эффект может быть получен за счёт использования асимметричного профиля, в последнем – профиль может быть и симметричным. В этом случае формируются два изображения. Но поскольку при этом используются обе стороны профиля, и каждая из них формирует свою часть единого изображения, это не приводит к снижению субъективной яркости.

Помимо повышения яркости применение асимметричного профиля полосы даёт новые защитные признаки. К таковым можно отнести асимметричное скрытое изображение и элемент «символ под лупой».

3. Защитные элементы с асимметричным профилем полосы

Асимметричный профиль даёт новые возможности повышения защитных свойств голограмм и формирования защитных признаков для неосведомлённой идентификации на интуитивном уровне. К числу таковых можно отнести асимметричное скрытое изображение и элемент «символ под лупой».

3.1. Асимметричное скрытое изображение.

Скрытые изображения как защитный элемент очень популярны. Они представляют собой голограмму Фурье, в которой действительное изображение удалено от плоскости голограммы и при обычном освещении не видно. Для его восстановления подсвечивают лазером участок голограммы и наблюдают записанное в нём изображение, спроецированное на экран. Довольно часто для этой цели используются специальные устройства с полупроводниковым лазером и матовым экраном (рис. 9). Однако, изображение нетрудно восстановить и с помощью обычной лазерной указки и листка бумаги.

При симметричном профиле полосы изображения в первом и минус первом порядке дифракции одинаковы (с точностью до зеркального отражения). Асимметричный профиль полосы позволяет сформировать скрытые элементы с различными изображениями в первом и минус первом порядках.

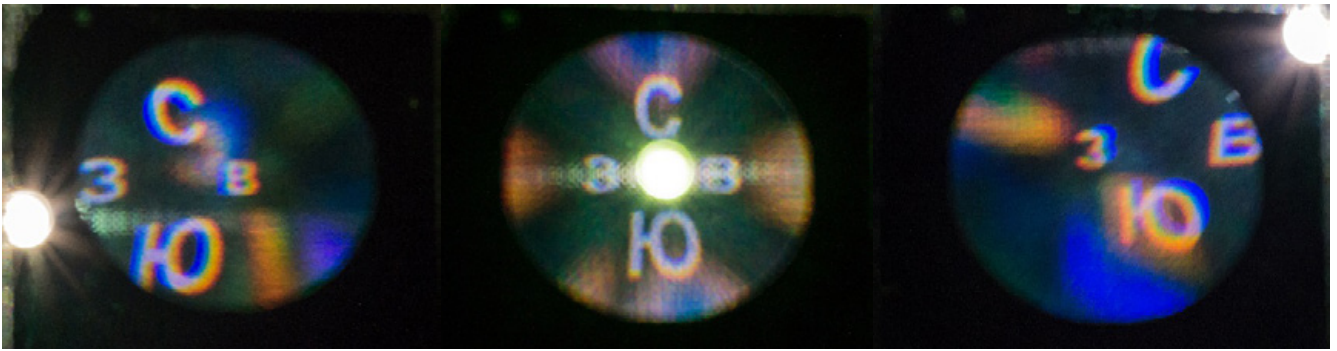


Рис. 11. LetterLens («символ под лупой»). Яркое пятно – изображение освещающего источника – нулевого порядка

3.2. LetterLens («символ под лупой»)

Если объект приблизить к плоскости голограммы, мнимое изображение можно наблюдать и без лазера. В этом случае, достаточно точечного освещения белым светом. Такие защитные элементы получили название LetterLens («символ под лупой»).

Поскольку объект приближен к плоскости голограммы, частота голографических полос быстро увеличивается от центра к краям области. Частота полос ограничена технологически, поэтому ограничен размер области. При изменении наклона голограммы изображение смещается довольно быстро. В результате этот защитный элемент выглядит как заглублённый на несколько мм объект, наблюдаемый через отверстие или находящийся под наложенной на него линзой.

Вводя искажение формы поверхности от сферической, можно получить дополнительные визуальные эффекты: заметная дисторсия, различные скорости перемещения изображения вдоль осей и т.д.

4. Аппаратура для изготовления голограмм с асимметричным профилем

Асимметричный профиль полосы не получить прямой интерференцией световых пучков. При интерференции получаются профили, близкие к синусоидальным просто по самой физической природе процесса. Эффективно применение в этих целях методов прямой оптической или электронно-лучевой записи [2]. Голографические полосы при этом должны быть синтезированы путём

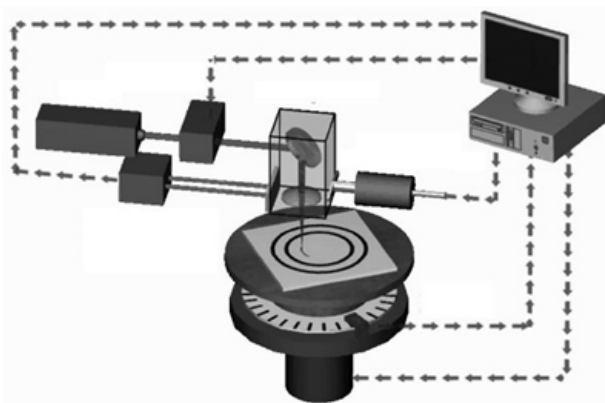


Рис. 12. Схема установки прямой поточечной записи CLWS-300IAE

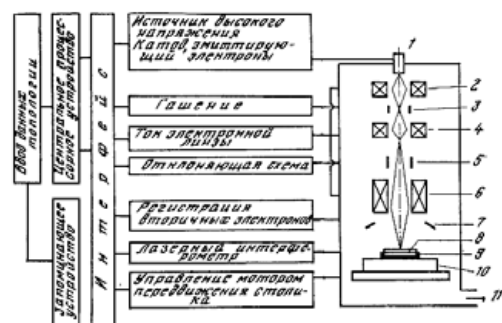
расчёта, а оборудование и регистрирующая среда должны иметь достаточную разрешающую способность для прямой их проекции или поточечной записи.

4.1. Оптические литографические машины с поточечной записью

В машинах прямой записи формирование рельефа происходит путём сканирования сфокусированного лазерного пучка по поверхности фоторезиста [6]. На рис. 12 представлена схема такой машины, работающей в полярной системе координат. Пластина фоторезиста устанавливается на вращающийся держатель, а сканирование по радиусу обеспечивается смещением оптической головки. Мощность в пучке пропорциональна необходимой глубине рельефа. После экспонирования пластина проявляется в щелочном проявителе, и вариации мощности преобразуются в градации рельефа. Минимальный размер элемента, изготавливаемого таким способом, определяется размером сканирующего пятна, и составляет около 3 мкм, поэтому такое оборудование пригодно только для записи литограмм и голограмм «кристалл».

4.2. Электронно-лучевые литографы

Электронно-лучевые литографические машины исторически развились из литографических приставок к электронным микроскопам, и в настоящее время представляют собой широкий класс оборудования, активно используемого при изготовлении микросхем и микроскопических оптических элементов. Принцип их работы такой же, как у оптических литографов, но сканирование поверхности регистрирующей среды осуществляется



1 — электронная пушка; 2 — фокусирующая линза; 3 — отклоняющие пластины гашения; 4 — фокусирующая линза; 5 — отклоняющие пластины сканирования; 6 — объектив; 7 — электрод регистрации вторичных электронов; 8 — резист; 9 — подложка; 10 — столик; 11 — вакуумирование

Рис. 13. Конструкция электронно-лучевой установки формирования рисунка

сфокусированным электронным пучком. Размер пятна у электронно-лучевых машин может быть существенно меньше 10 нм, поэтому все типы асимметричных рельефов и все типичные пространственные частоты могут быть реализованы с помощью этого оборудования.

На рис. 13 представлена принципиальная схема электронно-лучевого литографа. Пучок электронов эмитируется катодом 1 и под действием высокого напряжения устремляется вниз. На пути к регистрирующей среде 8 он проходит через систему фокусирующих и отклоняющих элементов 2–6. Отклоняющие электроды осуществляют сканирование сфокусированным электронным пятном в пределах небольшого поля – обычно не более сотен мкм. Смещение на большие величины производится с помощью прецизионного столика 10.

Особенностью таких устройств являются стабильные эмитирующие катоды, электромагнитные отклоняющие и фокусирующие системы, вакуумные камеры, прецизионные подвижные столики для регистрирующих сред. Необходимы также специальные помещения, виброзащитные фундаменты и целая гамма сопутствующего оборудования. Всё это делает очень затратным использование электронно-лучевых литографов для задач защитной голографии. Поэтому, несмотря на широкие возможности, электронно-лучевые литографы применяются в голографии нечасто.

4.3. Проекционные системы «дот-матрикс»

Как указывалось выше, использование оптического диапазона для формирования асимметричных рельефов проблематично из-за физических ограничений по требуемому разрешению и глубине резкости. Однако, коротковолновая часть оптического диапазона позволяет найти компромисс и получать вполне приемлемые результаты по достижимым частотам и глубинам рельефов. На рис. 14 приведена принципиальная схема такого устройства записи голограмм по технологии «дот-матрикс».

В отличие от рассмотренных выше устройств, голограмма экспонируется не поточечно, а небольшими участками – фреймами; π – изображение части системы полос выводится на жидкокристаллический пространственный модулятор, освещается лазером через формирователь пучка и с уменьшением проецируется на регистрирующую среду. После экспозиции одного фрейма

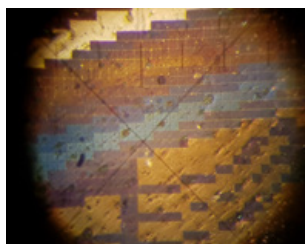


Рис. 15. Фотография голограммы «дот-матрикс» под микроскопом



Рис. 14. Схема устройства «дот-матрикс»

столик перемещается на его величину, и снова записывается очередной участок системы полос.

Границы фреймов заметны под микроскопом, голограмма имеет характерную матричную структуру (рис. 15), что обусловлено дифракцией на краях модулятора и погрешностями подвижного столика. Обычному наблюдателю матричная структура незаметна, если размер фрейма близок к пределу разрешения невооружённого глаза, поэтому устройства «дот-матрикс» вполне применимы в большинстве задач защитной голографии.

Небольшие голограммы рассчитываются заранее и делаются на фреймы. Для больших голограмм (100x100 мм и больше) чаще используется режим онлайн, когда расчёт производится одновременно с экспозицией. Скорость записи у всех рассмотренных выше систем составляет единицы кв. см в час при 100% заполнении поля. Однако во многих голографических задачах нет необходимости в плотном заполнении поля голограммы, а размеры желательнее иметь большие. Решить эту задачу призвана новая система записи, условно названная фреймовым литографом.

4.4. Фреймовый литограф

Фреймовый литограф представляет собой развитие идеи проекционного дот-матрикса на случай непрерывного движения фрейма. Схема его представлена на рис. 17.

Она отличается от схемы проекционного дот-матрикса наличием устройства поворота фрейма. В отличие от дот-матрикса, изображение фрейма непрерывно движется по поверхности регистрирующей среды вдоль голографической полосы с постоянной линейной скоростью и при этом поворачивается так, что одна из сторон фрейма параллельна касательной к траектории движения. Ампли-

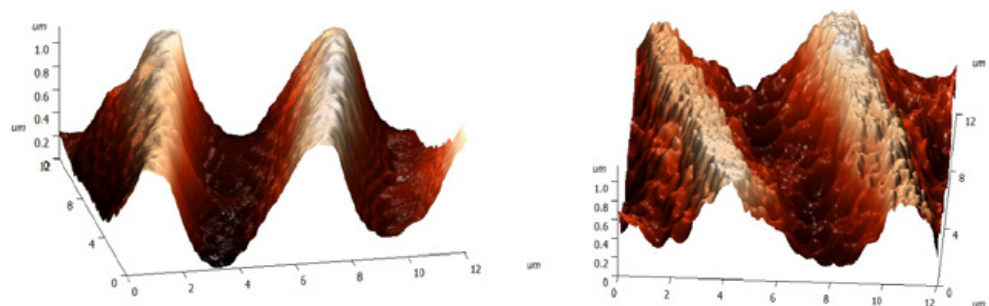


Рис. 16. Характерные профили асимметричных рельефов, полученные с помощью системы «дот-матрикс»



Рис. 17. Схема фреймового литографа

тудное распределение по фрейму соответствует желаемому профилю полосы. То есть, изображение фрейма представляет собой как бы резец, формирующий полосу. Фреймовый литограф работает в режиме векторного сканирования вдоль голографических полос. Это существенно ускоряет работу в случае большого размера голо-

граммы и низкого заполнения поля. Минимальная ширина полосы сопоставима с размером фрейма.

5. Заключение

Использование асимметричных профилей рельефа полос открывает новые возможности в поверхностно-рельефной голографии в отношении как повышения яркости изображения, так и защитных свойств. Высокая яркость изображения информативного порядка делает голограмму менее чувствительной к условиям освещения, что важно для неосведомлённой идентификации, а асимметричные скрытые изображения полезны для экспертной идентификации.

Аппаратура и программное обеспечение для формирования асимметричных профилей разработаны для разных вариантов голограмм. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. *Stamm, R.F.* Energy distribution of diffraction gratings as function of groove form / R.F. Stamm, N.J. Whale. – "JOSA", 1946. – v. 36. – p. 2.
2. *Кирьянов В.П., Никитин В.Г.* Моделирование процесса формирования отвесных участков кусочно-непрерывного профиля при одностадийной технологии записи ДОЭ наклонными лазерными пучками / Новосибирск: Автометрия, 2017. – Т. 53. – №6. – С. 15–22.
3. *Коганов А.В.* Формирование стереообраза на фрактализованной поверхности / А.В. Коганов. – М.: «Вопросы кибернетики» (Распознавание видеографической информации) под ред. В.Б. Бетелина. РАН, 1999. – С. 110–123.
4. *Колейчук В.Ф.* Штриховая стереография / В.Ф. Колейчук, Н.Г. Власов. – М.: Журнал научной и прикладной фотографии, 1997. – N.1. – Т.42. – С.68–71.
5. *Кольер Р.Дж.* Оптическая голография. (Optical Holography, 1971) / Р. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лин. Перевод с английского под редакцией Ю.И. Островского. – Москва: Издательство «Мир», 1973. – С. 258
6. *Полещук А.Г.* Лазерные технологии для формирования структуры дифракционных оптических элементов / А.Г. Полещук, В.П. Вейко, В.П. Корольков. – Сборник тезисов докладов. – HOLOEXPO 2017. – С. 39–45.
7. *Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.* Фейнмановские лекции по физике. Вып. 3–4, 1976. – С. 221–222, 412.
8. *Френеля линза* / Физическая энциклопедия / Гл. ред. А.М. Прохоров. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1998. – Т.5. – С.374–375.

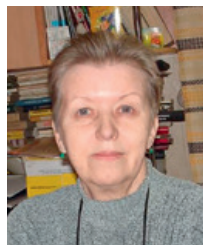
REFERENCES

1. *Stamm, R.F.* Energy distribution of diffraction gratings as function of groove form / R. F. Stamm, N. J. Whale. – "JOSA", 1946. – v. 36. – p. 2.
2. *Kirjanov V.P., Nikitin V.G.* Simulation of the vertical sections formation process of a piecewise continuous profile with a single-stage DOE recording technology by inclined laser beams / Novosibirsk: Autometry, 2017. – v.53. – N.6. – p. 15–22.
3. *Koganov A.V.* Creation of a stereographic image on a fractalized surface / A.V. Koganov. – M.: "Problems of cybernetics" edited by V.B. Betelin. RAS, 1999. – p. 110–123.
4. *Koleichuk V.F.* Dashed stereography / V.F. Koleichuk, N.G. Vlasov. – M.: Journal of Scientific and Applied Photography, 1997. – N.1. – v.42. – p. 68–71.
5. *Collier R.Jr.* Optical Holography / R.Jr. Collier, K. Berkhart, L.Lin. Translation from English edited by U.I. Ostrovsky. – M.: "Mir", 1973. – p. 258.
6. *Poleshchuk A.G.* Laser technologies for the formation of the diffractive optical elements structure / A.G. Poleshchuk, V.P. Veiko, V.P. Korolkov. – Book of abstracts. – HOLOEXPO 2017. – p. 39–45.
7. *Feynman R., Layton R., Sands M.* Feynman physics lectures. – v. 3-4, 1976. – p. 221–222, 412.
8. *Fresnel lens* / Physical encyclopedia / Chief Editor A.M. Prokhorov. – M.: Great Russian Encyclopedia, 1998. – v. 5. – С. 374–375.



СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТНО-ЗАВИСИМОЙ АМПЛИТУДНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ УСИЛИТЕЛЕЙ СИГНАЛОВ ЗВУКОВОЙ ЧАСТОТЫ.

Часть 2: Описание способа измерения динамических интермодуляционных искажений



Л.С. Тихонова, at_kte@mail.ru, к.т.н, СПбГИКиТ, РФ

Аннотация

Цикл из двух статей посвящён вопросам разработки способа измерения нелинейных искажений сигналов звуковой частоты, вносимых усилителями при работе с быстроизменяющимися сигналами большого уровня в сочетании с высокочастотными сигналами слабого уровня. Предлагаемый способ позволяет снизить суммарную погрешность измерений, трудоёмкость измерений и расчётов по сравнению со стандартизованным методом.

В данной статье дано описание разработанного способа измерения, предложено устройство для его осуществления.

Ключевые слова: способ измерения, нелинейные искажения, усилитель, сигналы звуковой частоты.

THE METHOD OF MEASURING THE FREQUENCY-DEPENDENT AMPLITUDE NONLINEARITY OF THE AMPLIFIERS OF AUDIO SIGNALS.

PART 2: DESCRIPTION OF THE METHOD OF MEASURING DYNAMIC INTERMODULATION DISTORTION

L. Tikhonova, at_kte@mail.ru, Ph.D, SPbGIKUCT, Russia

Abstract

A series of two articles devoted to the development of a method of measuring the nonlinear distortion of audio signals introduced by the amplifiers when working with rapidly changing signals of a high level in combination with high-frequency signals are of low level, allowing to reduce the total measurement error, the complexity of measurements and calculations compared to the standardized method.

In this article the description of the developed measurement method, the proposed device for its implementation.

Keywords: measurement method, nonlinear distortion, amplifier, audio frequency signals.

Введение

В первой части статьи [4] проведён исторический экскурс в глубины зарождения вопроса объективной оценки

нелинейных искажений и рассмотрен стандартизованный метод измерения динамических интермодуляционных искажений (ДИМИ), предложенный ещё в начале

70-х годов прошлого века, но имеющий несомненные преимущества перед распространёнными методами гармоник, взаимной модуляции и разностных тонов. Далее изложена суть предложений по усовершенствованию метода измерения ДИМИ, даны практические рекомендации по реализации измерительной установки для осуществления этих предложений.

Описание разработанного способа измерения и измерительной установки

На рис. 1 представлена структурная схема устройства (измерительной установки), реализующего предлагаемый способ измерения, где: 1 – генератор сигнала гармонической формы; 2 – генератор сигнала прямоугольной формы; 3 – первый выключатель; 4 – второй выключатель; 5 – первый фильтр нижних частот; 6 – сумматор; 7 – первый вольтметр среднеквадратических значений сигнала; 8 – объект измерения; 9 – второй вольтметр среднеквадратических значений сигнала; 10 – спектроанализатор или избирательный вольтметр; 11 – эквивалент нагрузки; 12 – блок формирования сигнала прямоугольной формы; 13 – третий выключатель; 14 – усилитель-ограничитель; 15 – дифференциатор; 16 – выпрямитель; 17 – программируемый счётчик-преобразователь; 18 – регулируемый аттенюатор; 19 – осциллограф; 20 – измерительный блок; 21 – перестраиваемый блок согласования; 22 – полосовой фильтр; 23 – линейный детектор; 24 – второй фильтр нижних частот; 25 – третий вольтметр среднеквадратических значений сигнала; 26 – вольтметр средневыпрямленных значений сигнала [3].

Предлагаемый способ предусматривает подачу на вход объекта измерения суперпозиции двух сигналов, обязательно синхронизированных между собой: перепаду сигнала прямоугольной формы должно соответствовать начало полупериода сигнала гармонической формы. К тому же, положительному перепаду сигнала прямоугольной формы должно соответствовать начало положительного полупериода сигнала гармонической формы, отрицательному перепаду – начало отрицательного полупериода. Второе условие требует не только кратности в целое число раз частот следования сигналов суперпозиции, но и нечётности этой кратности [3].

Для осуществления этих условий в устройство введён датчик синхронизированного сигнала, который непосредственно из сигнала гармонической формы частотой f_s вырабатывает синхронизированный с ним по фазе сигнал прямоугольной формы частотой f_q путём выполнения нескольких преобразований. К тому же, этот датчик имеет возможность перестройки: возможность изменять значение частоты f_q с сохранением нечётности кратности в целое число раз по отношению к значению частоты f_s .

Введённый блок 12 формирования сигнала прямоугольной формы подключён к выходу генератора 1 сигнала гармонической формы, а через третий выключатель 13 своим выходом соединён с выходом первого фильтра 5 нижних частот.

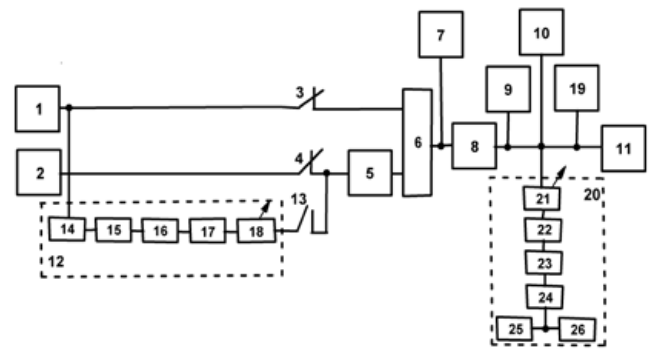


Рис. 1. Структурная схема предлагаемого устройства

Блок 12 содержит соединённые последовательно следующие узлы: усилитель-ограничитель 14, дифференциатор 15, выпрямитель 16, программируемый счётчик-преобразователь 17 и регулируемый аттенюатор 18.

В блоке формирования сигнала прямоугольной формы выполняются следующие преобразования: гармонический сигнал усиливается и ограничивается по амплитуде, далее дифференцируется для получения кратковременных импульсов; двухполупериодное выпрямление удваивает их частоту следования, преобразовывая в положительные импульсы запуска программируемого счётчика-преобразователя для дальнейшего получения сигнала строго прямоугольной формы с уменьшаемой в заданное нечётное число раз частотой следования f_q по отношению к частоте следования f_s сигнала гармонической формы.

Введённый блок 12 позволяет устранить такой недостаток, присущий стандартизованному методу, как зависимость получаемых показаний спектроанализатора или избирательного вольтметра от фазы сигнала гармонической формы в момент суммирования его с перепадом сигнала прямоугольной формы. При этом начале положительного полупериода сигнала прямоугольной формы соответствует начало положительного полупериода сигнала гармонической формы, а началу отрицательного полупериода сигнала прямоугольной формы соответствует начало отрицательного полупериода сигнала гармонической формы, чем снижается влияние методических погрешностей на результаты измерений.

Однако при использовании синхронизированных между собой сигналов суперпозиции кратность их частот усложняет процедуру измерений, так как продукты усиления и продукты нелинейных искажений будут располагаться близко по частоте друг к другу и с трудом выявляться с помощью частотно-избирательного прибора. Обойти эти трудности можно, изменив характер измерительной процедуры.

Предлагается перейти к прямой процедуре измерений, снижающей трудоёмкость измерений и расчётов (т.к. значительно меньше отсчётов показаний измерительных приборов), а расчёты коэффициентов проводить по несложной формуле как отношение среднеквадратического значения переменной составляющей огибающей к её

постоянной составляющей с учётом поправки, обусловленной возможным присутствием составляющих сигнала прямоугольной формы в полосе частот амплитудно-модулированного сигнала с частотой несущей f_s .

Для перехода к прямой процедуре измерений обратимся к использованию принципа взаимной модуляции двух сигналов, в основе которого лежит идея использования в качестве испытательного сигнала суперпозиции двух сигналов с настолько далеко разнесёнными спектрами, что после воздействия этих сигналов на объект измерения, обладающего амплитудной нелинейностью, из спектра его выходного сигнала можно выделить полосу частот амплитудно-модулированной первой гармоники высокочастотного сигнала, не перекрываемую гармониками низкочастотного сигнала. Тогда значение величины модуляции выделенного амплитудно-модулированного сигнала прямым образом будет отражать количественную оценку амплитудной нелинейности объекта измерения.

Отметим сохранение предложенным способом такого достоинства стандартизованного метода, как способность оценивать дифференциальный коэффициент передачи объекта измерения в широком диапазоне значений входного сигнала, определяемом размахом низкочастотного сигнала частотой следования f_q .

Для оценки искажений с использованием принципа взаимной модуляции частоты следования сигналов, суперпозиции должны существенно отличаться, так как сигнал прямоугольной формы имеет широкий спектр, который не должен перекрывать спектр результирующего амплитудно-модулированного сигнала. Если же это все-таки происходит, то должно учитываться в виде поправки к значению результирующей постоянной составляющей сигнала, получаемого после выделения спектра амплитудно-модулируемого сигнала, его детектирования и низкочастотной фильтрации.

Поправки же к значению переменной составляющей этого сигнала не потребуются, поскольку высшие гармоники сигнала прямоугольной формы, попадающие в полосу пропускания полосового фильтра, образуют периодический, но не амплитудно-модулированный сигнал, а значит, не содержащий переменную составляющую после его обработки в детекторе.

Методические аспекты обеспечения измерений

Частоты следования сигналов суперпозиции f_q и f_s выбираются следующим образом: частоты продуктов интермодуляции ($f_s - nf_q$), расположенные ниже частоты f_s , должны быть больше, чем высшая значимая составляющая сигнала прямоугольной формы, где n – число учитываемых продуктов интермодуляции в спектре амплитудно-модулированного сигнала. Если принять в расчёт 15 составляющих сигнала прямоугольной формы и 15 продуктов взаимной модуляции, то частоты f_q и f_s должны отличаться не менее чем в 30 раз, а с учётом нечётности отношения частот – не менее чем в 31 раз. При этом следует придерживаться рекомендации стандарта [1],

которая гласит, что для устранения влияния на результаты измерений неравномерности частотной характеристики объекта измерения, частота сигнала гармонической формы f_s должна быть от 0,5 до 1,5 октав ниже верхней граничной частоты эффективного диапазона частот объекта измерения, а частота сигнала прямоугольной формы f_q должна быть от 0,5 до 1,5 октав выше нижней граничной частоты эффективного диапазона частот объекта измерения.

Для высококачественной аппаратуры можно предложить использование частоты следования для сигнала гармонической формы $f_s = 14$ кГц, что близко к стандартизованному способу, а для сигнала прямоугольной формы принять $f_q = 400$ Гц, что составит отношение частот, равное 35.

Первый фильтр 5 нижних частот не должен ограничивать полосу частот прямоугольного сигнала, в противном случае не будет достигаться высокая крутизна перепадов в форме его волны. В стандартизованном способе рекомендуется частота среза фильтра порядка 100 кГц, что соответствует прохождению 249 составляющих сигнала прямоугольной формы с частотой следования $f_q = 400$ Гц, а значит, отсутствию влияния фильтрации на форму волны сигнала.

Полосовой фильтр 22, выделяющий спектр амплитудно-модулированного сигнала, должен иметь среднюю частоту, равную частоте f_s , а ширину полосы пропускания – способную выделить удвоенное значение числа желаемых быть учтёнными продуктов интермодуляции. В рассматриваемом случае она составит 12 кГц.

Измерительный алгоритм предлагаемого способа осуществляется с помощью измерительного блока 20 и включает в себя: выделение с помощью полосового фильтра (блок 22) спектра амплитудно-модулированного сигнала с несущей частотой f_s , линейное детектирование (блок 23) для получения спектра огибающей с минимальными частотными искажениями и выделение его в низкочастотной области (блок 24). Непосредственно количественная оценка искажений производится посредством отсчётов показаний вольтметров среднеквадратического (блок 25) и средневыпрямленного (блок 26) значений сигнала, подключённых к выходу второго фильтра 24 нижних частот.

Значение постоянной составляющей $U_{ог}$ формы огибающей несёт информацию о величине несущего колебания частотой f_s , а значение переменной составляющей $U_{ог}$ формы огибающей – о величине внесённых искажений в результате воздействия амплитудной нелинейности объекта измерения на суперпозицию сигналов.

Основным источником погрешности при проведении прямого измерения коэффициента нелинейности являются составляющие сигнала прямоугольной формы, которые попадают в исследуемую область спектра и искажают результаты измерения величины искажений. Устранить эту погрешность можно посредством проведения измерения величины так называемого поправочного

сигнала. Для этого из суперпозиции входных сигналов следует исключить сигнал гармонической формы, оставив только сигнал прямоугольной формы без изменения его величины. Выходной сигнал объекта измерения подвергнуть тем же преобразованиям, что и выходной сигнал объекта измерения при подаче суперпозиции сигналов. Сигнал, образованный суммой высших составляющих сигнала прямоугольной формы, попавших в полосу пропускания полосового фильтра, представляет собой некий периодический сигнал с частотой следования, соответствующей частоте самой низкочастотной из попавших в полосу пропускания фильтра составляющих, но главное, он не является амплитудно-модулированным сигналом. Это означает, что эффективное значение переменной составляющей (среднеквадратическое значение) такого сигнала будет равно нулю. При этом значение постоянной составляющей этого сигнала (средневыпрямленное значение) $U_{\text{попр}}$ будет свидетельствовать о присутствии и интенсивности составляющих сигнала прямоугольной формы в полосе анализа огибающей амплитудно-модулированного сигнала. Именно это значение принимается за поправку к значению постоянной составляющей $U_{\text{СУМ}}$ при определении значения постоянной составляющей огибающей

$$U_{\text{ог}} = U_{\text{СУМ}} - U_{\text{попр}},$$

где $U_{\text{СУМ}}$ – значение постоянной составляющей на выходе второго фильтра 24 нижних частот измерительного блока 20, измеренное при подаче на вход суперпозиции сигналов.

Использование предложенного измерительного алгоритма обработки выходного сигнала объекта измерения позволяет перейти к определению количественной меры искажений как отношения интенсивности переменной составляющей огибающей к интенсивности e постоянной составляющей

$$K_{\text{ДИМИ}} = \frac{U_{\text{ог}} \sqrt{2}}{U_{\text{СУМ}} - U_{\text{попр}}} = \frac{U_{\text{ог}} \sqrt{2}}{U_{\text{ог}}}.$$

Появление в числителе формулы константы $\sqrt{2}$ обусловлено тем, что значение $U_{\text{ог}}$ соответствует среднеквадратическому значению напряжения переменной составляющей огибающей, а средневыпрямленное значение постоянной составляющей огибающей $U_{\text{ог}}$ соответствует амплитуде несущего колебания частотой f_s , и перейти к среднеквадратическому значению можно следующим образом:

$$U_{\text{ог}} / \sqrt{2}$$

Таким образом, измерительная процедура сводится к трём отсчётам по шкале того или иного измерительного прибора (вольтметра) и расчёту коэффициента искажений по простой формуле, приведённой выше, что

свидетельствует о существенном снижении суммарной погрешности измерения, об упрощении измерительной процедуры и уменьшении трудоёмкости расчётов для определения количественного показателя искажений.

Измерительная процедура сводится к следующим действиям.

Объект 8 измерения устанавливается в стандартные условия. На его вход с помощью сумматора 6 от генератора 1 и блока 12 формирования сигнала прямоугольной формы подаётся суперпозиция сигналов гармонической и прямоугольной форм с частотами следования f_s и f_q , соответственно кратными друг другу в нечётное число раз.

Напряжение генератора 1 и блока 12 увеличивают, не нарушая установленного четырёхкратного соотношения пиковых значений сигналов, до тех пор, пока напряжение на выходе объекта 8 измерения не достигнет номинального значения или какого-либо другого желаемого значения. Затем измеряют с помощью вольтметров 25 и 26 среднеквадратическое и средневыпрямленное значения огибающей амплитудно-модулированного сигнала, появляющегося в спектре выходного сигнала объекта 8 измерения вследствие его частотно-зависимой амплитудной нелинейности. Затем с помощью вольтметра 26 производят измерение средневыпрямленного значения поправочного выходного напряжения, получаемого на выходе измерительного блока 20 при подаче на вход объекта 8 измерения только сигнала прямоугольной формы, для чего используется первый выключатель 3, отключающий генератор 1 сигнала гармонической формы. Далее проводится расчёт по формуле, приведённой выше.

Введение осциллографа 19, подключённого к выходу объекта 8 измерения, позволяет наблюдать характер вносимых искажений, что обеспечивается использованием строго синхронизированных друг с другом сигналов суперпозиции, к тому же имеющих в нечётное число раз соотношение частот следования. Изменением развёртки осциллографа по шкале абсцисс можно добиться детального рассмотрения влияния искажений на форму гармонического сигнала в области перепада (положительного или отрицательного) сигнала прямоугольной формы.

Перевод третьего выключателя 13 в положение «разомкнуто», а второго выключателя 4 в положение «замкнуто», позволит вернуть устройство к готовности проведения измерений, предусмотренных стандартизованным методом.

Практические аспекты реализации блоков предлагаемого устройства

Остановимся на практических соображениях реализации некоторых блоков устройства. Прежде всего, это касается точности выполнения амплитудного детектирования: при малых величинах исследуемого сигнала обычный выпрямитель вносит квадратичные искажения. Для уменьшения возникающих нелинейных искажений

целесообразно применить существующие способы прецизионного вычисления модуля переменного сигнала, обеспечивающие при реализации линейность названного преобразования в достаточно широком динамическом диапазоне, хотя это и усложнит схему детектора.

Также следует отметить необходимость соблюдения жёстких требований к оптимизации форм частотных характеристик полосового фильтра 22 и обоих фильтров нижних частот (блоки 5 и 24), входящих в измерительный блок 20. В противном случае изменения формы прямоугольного сигнала, обусловленные возникшими линейными искажениями, могут привести к неустраняемым изменениям формы исследуемого суммарного сигнала и повлиять на результаты измерений. При реализации фильтров предпочтение следует отдать пассивным фильтрам.

Заключение

Завершая цикл из двух статей, хочется отметить, что практическое применение предложенного измерительного способа потребует воплощения некоторых блоков в составе измерительной установки или создания отдельного радиоизмерительного прибора. Второй существенной предпосылкой внедрения является проведение слуховых экспертиз и предложение количественных норм для результатов измерения коэффициентов ДИМИ, соответствующих разным категориям качества воспринимаемого звучания при прослушивании аудиопрограмм. Первое условие можно отнести и к упомянутым в первой статье [4] стандартизированным методам, кроме метода гармоник, однако второе условие можно отнести ко всем четырём методам, несмотря на распространённость трёх из них и даже наличие количественных рекомендаций, опубликованных в технической литературе и установленных норматив-

ными документами ещё в период расцвета интереса к обсуждаемому вопросу, и в частности, в [5,6]. При этом хочется отметить, что приведённые в [5] результаты исследований относятся к аппаратуре середины прошлого века с присущей ей элементной базой и схемотехническими приёмами, а необоснованность предлагаемых в документе [6] величин коэффициентов общих гармонических искажений кроется в мизерности конкретных «узаконенных» величин, находящихся на уровне 0,005-0,007 % (что много ниже порога «чувствительности» физической измерительной установки) для усилителей высшей категории сложности, и в их стократном увеличении для усилителей более низкой категории сложности, вплоть до 1,2 % для ламповых (формулировка документа) полных усилителей 2-ой категории.

Впрочем, оба условия практического внедрения предложенного способа вполне выполнимы при дальнейшем развитии вопроса его методико-аппаратного обеспечения. Оптимизм предположения подкреплён разработками, выполненными ранее на кафедре радиотехники и информационных технологий СПбГИКиТ. Во-первых, было реализовано само предложенное устройство, что собственно и позволило окончательно сформировать измерительную процедуру и подход к расчёту коэффициентов ДИМИ. Во-вторых, хорошей перспективой получения количественных норм для коэффициентов ДИМИ является возможность проведения слуховых экспертиз с помощью такого разработанного и реализованного технического средства, как имитатор нелинейных искажений [7]. Имитатор моделирует различные виды нелинейных искажений электрического сигнала, возникающих в звукотехнической аппаратуре, и в частности ДИМИ, и предназначен для проведения различных звукотехнических измерительных процедур, в том числе, и с использованием сигналов аудиопрограмм. ■

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. ГОСТ 23849-87. АППАРАТУРА РАДИОЭЛЕКТРОННАЯ БЫТОВАЯ. Методы измерения электрических параметров усилителей сигналов звуковой частоты [Текст]. – М.: Изд. стандартов, 1990 г.
2. *Leinonen E., Ojala M., Curl J.* A Method for Measuring Transient Intermodulation Distortion [Text]. – JAES, 1977, № 4, p. 170–177.
3. Патент РФ на изобретение № 2 566 386 (RU 2 566 386 C1). МПК G 01R 23/20 (2006.01). Способ измерения динамических интермодуляционных искажений электрического сигнала и устройство для его осуществления [Текст] / *Тихонова Л.С.*; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский государственный университет кино и телевидения. – №2014116335, 22.04.2014. Опубл. 27.10.2015, бюл. № 30.
4. *Тихонова Л.С.* Способ измерения частотно-зависимой амплитудной нелинейности усилителей сигналов звуковой частоты. Часть 1: Предпосылки разработки [Текст]. – Мир техники кино, 2017–4(11). С. 27–30.
5. ГОСТ 24388-88. УСИЛИТЕЛИ СИГНАЛОВ ЗВУКОВОЙ ЧАСТОТЫ. Общие Технические условия [Текст]. – М.: Изд. стандартов, 1989 г.
6. Исследование заметности искажений в радиовещательных каналах. Под ред. *Е.И. Горона*. [Текст]. – М.: Связьиздат, 1959.
7. *Тихонова Л.С.* Имитатор нелинейных искажений электрического сигнала [Текст]. – Мир техники кино, 2013–3(7), № 29, С. 8–12.



САМЫЕ ПЕРВЫЕ В ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ МИРОВОГО КИНЕМАТОГРАФА



■ Н.А. Майоров, henrymay@mail.ru, cinemafirst.ru,
режиссёр-оператор, киновед, член Союза кинематографистов РФ

Продолжение. Начало в МТК 2013-1,2,3(7): №27,28,29;
2014-1(8): №31; 2015-1(9): №35

■ 1958

– Началась эра стереофонической записи звука на пластинки.

– В феврале в Киеве открылся первый в СССР панорамный кинотеатр «Кинопанорама» (МТК 2011-4(5): №22). Началась демонстрация первого советского цветного панорамного фильма с девятиканальным стереофоническим звуком «Широка страна моя...», снятого по советской трёхплёночной системе «Кинопанорама».

– 28 марта в московском панорамном кинотеатре «Мир» состоялась официальная премьера первого советского панорамного фильма «Широка страна моя...».



Демонстрация панорамного фильма «Широка страна моя...» в московском панорамном кинотеатре «Мир». © Н. Майоров. Реконструкция, 2010

– 9 апреля выпущен на экран первый и последний цветной панорамный фильм «Windjammer: The Voyage of the Christian Radich» (Парусник), снятый по трёхплёночной системе «Cinemiracle» (Синемирэкл), премьера которого состоялась 5 апреля 1958 года в «Китайском Театре» (Graumons Chinese) в Лос-Анджелесе (Los Angeles), США (МТК 2011-4(5): №22).

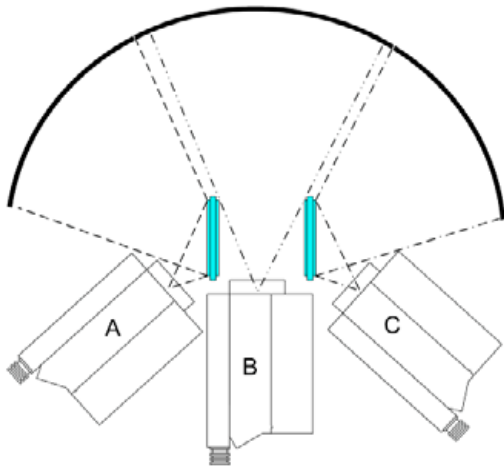


Реклама фильма «Windjammer: The Voyage Of The Christian Radich» на фасаде «Китайского Театра» (Graumons Chinese) (1958)



Кадр из фильма «Windjammer: The Voyage of the Christian Radich» (Парусник) (1958)

Панорамная система «Синемирэкл» была разработана компанией «Smith-Dietrich Corporation». Для съёмки по этой системе была создана установка из трёх модифицированных кинокамер фирмы «Mitchell».



Принцип съёмки по системе «Cinemiracle»: А – камера, снимает через зеркало левую часть панорамы; В – центральная камера; С – камера, снимает через зеркало правую часть. На каждой из камер установлен объектив с фокусным расстоянием 27 мм

1959

– 29 января выпущен на экран первый широкоэкранный мультфильм со стереофоническим звуком «Sleeping Beauty» (Спящая красавица), снятый по широкоэкранный системе «Super Technirama 70» (Супер Технирама 70).

– 16 июня в Москве состоялся первый платный сеанс в кинотеатре «Круговая кинопанорама» на ВДНХ. Был показан **первый советский кругорамный цветной фильм с девятиканальным стереофоническим звуком «Дорога весны»** (МТК 2009-2(3): №12).

– 4 августа в нью-йоркском кинотеатре «Риволи» (Rivoli) состоялась премьера «The Big Fisherman» (Большой рыбак) – **первого широкоформатного фильма с шестиканальным стереофоническим звуком**, снятого по системе «Super Panavision 70» (Супер Панавижн



Кинотеатр «Круговая кинопанорама» на ВДНХ в Москве (1959)

70), разработанной в 1958 году американской фирмой «Panavision» (Панавижн) с параметрами, аналогичными системе «Тодд А.О.», но с применением объективов собственной конструкции.

– 18 ноября 1959 года в Нью-Йорке (New York) состоялась премьера цветного широкоформатного фильма со стереофоническим звуком «Ben Hur» (Бен Гур), снятого по системе «MGM Camera 65». Фильм демонстрировался с 70-мм копии.

MGM Camera 65® / Ultra Panavision 70® (МГМ камера 65 / Ультра Панавижн 70)

В 1956 году кинокомпания «Metro Goldwyn Mayer» заказала президенту корпорации «Panavision, Inc.» Роберту Готчолку (Robert Gottschalk) разработку новой широкоэкранный системы для проекции на экран, аналогичной системе «Cinerama», но использующей для съёмки однопленочный метод. При разработке новой системы, в целях унификации съёмочного, копировального и проекционного оборудования, использовались параметры киноплёнки, частота съёмки, размеры съёмочного кадра и проецируемого участка изображения, принятые для системы «Todd A.O.». В то же время, для решения задачи по увеличению ширины изображения к его высоте, при съёмке используется анаморфотная насадка с коэффи-

Табл. 1. Основные характеристики систем «MGM Camera 65®» и «Ultra Panavision 70®»

ПОКАЗАТЕЛИ	СИСТЕМА КИНЕМАТОГРАФА	
	«MGM Camera 65»	«Ultra Panavision 70»
Размер негатива в мм	65	65
Размер кадра негатива в мм	52,63x23,05	52,63x23,01
Размер позитива в мм	65 / 70	70
Размер проецируемого кадра в мм	52,12x22,5 / 48,6x22	48,6x22
Коэффициент анаморфирования при съёмке	0,75	0,8
Коэффициент анаморфирования при проекции	1,33	1,25
Соотношение сторон на экране	3:1 / 2.93:1	2.75:1
Шаг кадра в мм	23,75	23,75
Фонограмма на 65-мм копии	Магнитная шестиканальная на отдельной 35-мм плёнке	-
Фонограмма на 70-мм копии	Магнитная шестиканальная	Магнитная шестиканальная

циентом анаморфирования 0,75, а при проекции применяются проекционные объективы или насадки с коэффициентом анаморфирования 1,33. Из таблицы 1, в которой приведены основные характеристики системы «MGM Camera 65®», видно, что система «MGM Camera 65» позволяет получить соотношение кадра на экране от 3:1 до 2.93:1. Напомним, что в «Cinerama» оно равняется 2.59:1.

В разработанной в 1958 году компанией «Panavision, Inc.» системе «Ultra Panavision 70®» это соотношение стало равняться 2.75:1 за счёт изменения коэффициента анаморфирования при съёмке на коэффициент 0,8, а при проекции – на 1,25.

В новой системе, помимо изменения коэффициента анаморфирования, позитивные копии печатаются только на 70-мм киноплёнке, в то время как по системе «MGM Camera 65» предусматривалась и печать 65-мм позитива для демонстрации его синхронно с отдельной шестиканальной фонограммой, записанной на 35-мм магнитной плёнке.

Специально для системы «Ultra Panavision 70®» был разработан объектив с переменным фокусным расстоянием и набор высококачественных объективов с фокусными расстояниями от 35 до 300 мм.

Помимо печати контактным способом 70-мм фильмокопий, обе системы давали возможность получения оптической печатью анаморфированных фильмокопий на 35-мм киноплёнке, как с оптической, так и с магнитной фонограммой.

Поскольку композиция кадра выстраивалась оператором для соотношения сторон изображения на экране равным 2.76:1, то при переводе фильма в другие системы кинематографа с меньшим соотношением сторон кадра, в целях сохранения в полном объёме изображения, используется принцип под названием «почтовый ящик» (Letterbox). То есть изображение не подрезается справа и слева, как при процессе выкопировки, а располагается по всей ширине кадра с чёрными полями сверху и снизу, как в кадре по системе «явное каше».

При тиражировании фильма «Бен Гур» было выпущено несколько вариантов в различных системах кинематографа (табл. 2).

Компания «Panavision, Inc.» разработала специальную оптическую систему «Micro Panatar» и всё необходимое оборудование для печати с 65-мм негатива, снятого в обеих системах, трёх отдельных частей изображения на

Табл. 2. Варианты форматов изображения прокатных копий фильма «Бен Гур»

Система кинематографа	Плёнка	Формат изображения на экране
MGM Camera 65®	70 мм	2.76:1 (анаморфированный)
Todd A.O.®	70 мм	2.76:1 (кашированный)
Todd A.O.®	70 мм	2.21:1 (выкопировка)
Cinemascope®	35 мм	2.76:1 (кашированный)
Cinemascope®	35 мм	2.55:1 (выкопировка)
Cinemascope®	35 мм	2.35:1 (выкопировка)
Обычный	35 мм	1.85:1 (кашированный «Pan&Scan»)
Обычный	35 мм	1.37:1 (выкопировка «Pan&Scan»)

трёх 35-мм киноплёнках для демонстрации их по трёхплёночной системе «Cinerama».

По системе «MGM Camera 65®» на киностудии «Metro Goldwyn Mayer» были сняты только два игровых широкоформатных фильма. Первый из них, цветной игровой фильм «Raintree County» (Округ Рейнтри) демонстрировался в кинотеатрах только с 35-мм копий по системе «CinemaScope®». На премьере, которая прошла 2 октября 1957 года в кинотеатре «Браун» (Brown) в Луизвилле (Louisville), фильм также демонстрировался по системе «CinemaScope®».

Первым широкоформатным игровым фильмом, полностью снятым и демонстрировавшимся по системе «MGM Camera 65®», стал «BEN HUR» (Бен Гур). Его премьера прошла 18 ноября 1959 года в кинотеатре «State» в Нью-Йорке.

«Бен Гур» – первый фильм в истории мирового кинематографа, завоевавший одиннадцать «Оскаров»: «Лучший фильм», «Лучший режиссёр», «Лучший актёр», «Лучший актёр второго плана», «Лучший оператор», «Лучший художник», «Лучший художник по костюмам», «Лучший композитор», «Лучший звук», «Лучшие спецэффекты», «Лучший монтаж».

Первым по системе «Ultra Panavision 70®» был снят приключенческий фильм «Mutiny on the Bounty» (Мятеж в Баунти) с Марлоном Брандо (Marlon Brando) в главной роли. Его премьера состоялась 8 ноября 1962 года в нью-йоркском кинотеатре «State».

Фильмы, снятые по системам «Ultra Panavision 70» и «MGM Camera 65», демонстрировались в основном на



70-мм позитив с анаморфированным кадром из кинофильма «Ben Hur» (Бен Гур) (1959)



Кадр из кинофильма «Ben Hur» (Бен Гур)(1959)

**ПРИМЕРЫ ПРОЕКЦИИ 70-ММ КОПИИ НА ЭКРАН
ПО СИСТЕМЕ «CINERAMA» С ДУГОЙ В 146°**



70-мм позитив с анаморфированным кадром из кинофильма «Khartoum» (Хартум) (1966)



Проекция со сферической оптикой



Проекция со специальным объективом

плоские или слегка дугообразные экраны в широкоформатных кинотеатрах по системе «Todd A.O.» и в обычных широкоэкранных кинотеатрах с 35-мм анаморфированного позитива. При этом соотношение сторон кадра на экране равнялось в широкоформатных копиях 2.2:1, в широкоэкранных – 2.35:1, для чего производилась выкопировка изображения с частичным отсечением его по краям кадра. То есть отрезается до 38% изображения, что делает бессмысленным съёмку с таким форматом кадра.

В 1962 году система «Ultra Panavision 70» была использована для съёмки части материала игрового фильма «HOW THE WEST WAS WON» (Как был завоёван Запад) с последующим переводом его на три отдельные плёнки для демонстрации по системе «Cinerama».

Только спустя шесть лет после введения в эксплуатацию была реализована идея, для которой и разрабатывались системы «Ultra Panavision 70» и «MGM Camera 65» – демонстрация фильма на панорамный дугообразный экран, принятый в системе «Cinerama».

Для обеспечения высококачественной проекции на сильно изогнутый экран разработчикам системы необходимо было учесть, что при проекции с плоского кадра на дугообразный экран возникают недопустимые искажения

изображения и по вертикали, и по горизонтали. Причём, чем больше кривизна экрана, тем больше эти искажения. Для устранения недостатков было предложено два варианта компенсации искажений: применение специальной оптики на кинопроекторах или печать фильмокопии с искажениями, противоположными тем, которые имеют место при проекции на сильно изогнутый экран. Печать 70-мм фильмокопии с помощью особых оптических копировальных аппаратов, вносящих «обратные» искажения в изображения кадров позитива, была разработана для первого варианта системы «Todd A.O.». Но этот способ не нашёл широкого применения из-за его сложности и необходимости изготавливать несколько видов копий для различных кинотеатров с разными проекционными расстояниями и формой экрана. Практически для каждого экрана необходимо было печатать свою копию.

Разработчики широкоформатных систем в середине прошлого века посчитали более перспективным для исправления искажений использовать специальные проекционные объективы, несмотря на то, что создание таких объективов представляло в то время сложную оптическую задачу.

Необходимость применения специальной проекционной оптики или печати специальной копии для каждого кинотеатра – главная причина отказа от применения сильно изогнутых экранов при массовом распространении широкоформатной проекции в мире. Поэтому подавляющее большинство широкоформатных кинотеатров использовало обычные типы сферических проекционных объективов и слабо изогнутые или плоские экраны.



70-мм позитив с анаморфированным кадром из кинофильма «It's A Mad, Mad, Mad, Mad World» (Это безумный, безумный, безумный, безумный мир) (1963)

7 ноября 1963 года на бульваре Сансет (Sunset Boulevard) в Голливуде для демонстрации панорамных фильмов по одноплёночной системе «Cinerama 70» открылся новый кинотеатр «Pacific Cinerama Dome». В зале кинотеатра по дуге в 126° был установлен экран шириной 26,23 м и высотой 9,76 м. Кинотеатр открылся премьерой фильма Стенли Крамера (Stanley Kramer) «IT'S A MAD, MAD, MAD, MAD WORLD» (Это безумный, безумный, безумный, безумный мир), снятого по системе «Ultra Panavision 70».

3 января 1966 года в московском панорамном кинотеатре «Мир» кинокомедия «It's A Mad, Mad, Mad, Mad World» начала демонстрироваться по системе «Cinerama 70» с синхронным закадровым переводом. 24 января 1966 года началась демонстрация варианта фильма с

шестиканальным стереофоническим звуком, полностью дублированного на русский язык. В этот же день фильм был выпущен в прокат на территории СССР в широкоформатном и в широкоэкранном вариантах. В панорамных кинотеатрах СССР демонстрация фильма велась с 70-мм позитива по системе «Cinerama 70» с шестиканальным стереофоническим звуком. Кстати, звуковые эффекты оригинальной фонограммы фильма были удостоены премии «Оскар» за 1963 год в номинации «Лучшие звуковые эффекты». Через год, 27 марта 1967 года, в советский прокат был выпущен обычный вариант этого фильма (1.37:1).



Демонстрация фильма «It's A Mad, Mad, Mad, Mad World» на панорамном экране 33 м с дугой 146° по системе «Cinerama 70» в московском кинотеатре «Мир»

Следующие четыре игровых фильма, снятые по системе «Ultra Panavision 70» в 60-е годы прошлого века, выпускались на экран в панорамных кинотеатрах многих стран мира по системе «Синерама 70». Но ни один из них по идеологическим причинам на советский экран не попал.



Кадр из фильма «The Greatest Story Ever Told» (Величайшая история, когда-либо рассказанная), снятый по системе «Ultra Panavision 70®» (1965)

7 декабря 2015 года в кинотеатре «Cinerama Dome» в Лос-Анджелесе прошла премьера вестерна «The Hateful Eight» (Омерзительная восьмёрка) – восьмого фильма Квентина Тарантино (Quentin Tarantino), 11-го фильма в истории мирового кино, снятого по системе «Ultra Panavision 70®» на 65-мм киноплёнке.

1960

– Киностудия «Центрнаучфильм» выпустила **первые советские полиэкранные** фильмы «Во имя жизни», «Утро космической эры» и «Земля-Космос-Земля», демонстрировавшиеся на семи экранах со стереофоническим звуком.



Кадр из фильма «The Hateful Eight» (Омерзительная восьмёрка) (2015)

– 6 января в Нью-Йорке (New York City) компания «Michael Todd Company» начинает демонстрировать «Scent of Mystery» (Аромат тайны) – **первый в мире фильм с запахом** по системе «Smell-o-Vision». Кинотеатр был оборудован системой, которая выделяла различные ароматы в соответствии со специальными сигналами, записанными на плёнке.

– 9 сентября в США началась демонстрация **первого в мире цветного широкоэкранного стереоскопического фильма** со стереофоническим звуком «September Storm» (Сентябрьский шторм), снятого по системе «CinemaScope».

1961

– 21 июля выпущен на экран **первый в мире советский игровой панорамный фильм с девятиканальным стереофоническим звуком** «Опасные повороты», снятый по советской трёхплёночной системе «Кинопанорама».

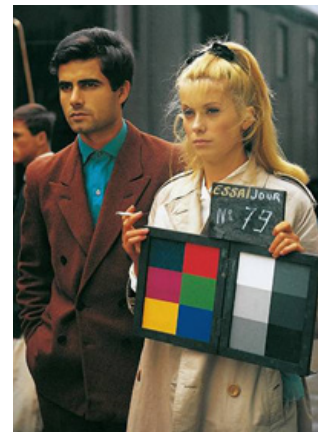
1963

– 7 ноября в США в голливудском кинотеатре «Cinerama Dome» (Синерама Дом) состоялась премьера «It's a mad, mad, mad, mad world» (Это безумный, безумный, безумный, безумный мир) – первого фильма в однообъективной системе «Cinerama» – «Ultra Panavision 70» (Ультра Панавижн 70) на 70-мм плёнке, разработанной киностудией «Metro Goldwyn Mayer» (Метро Голдвин Майер) совместно с фирмой «Panavision» (Панавижн) в 1962 году.

1964

– Английское отделение фирмы «Technicolor» (Техниколор) создало широкоэкранную систему «Techniscope» (Технископ) с применением для съёмки 35-мм плёнки с вертикальным кадром с шагом в две перфорации, с переходом в фильмокопии на обычный размер кадра широкоэкранного фильма с анаморфированным изображением (МТК 2012-4(6): №26).

– 19 февраля во Франции выпущена на экран **первая в мире киноопера** «Les Parapluies de Cherbourg» (Шербургские зонтики). ■



Исполнители главных ролей Нино Кастельнуово (Nino Castelnuovo) и Катрин Денёв (Catherine Deneuve) на съёмочной площадке фильма «Шербургские зонтики» (1964)

Продолжение следует