

Рекомендация МСЭ-R ВТ.2163-0

(11/2023)

Серия ВТ: Радиовещательная служба
(телевизионная)

**Алгоритм объективных измерений
для оценки яркости в телевидении
большого динамического диапазона**

Предисловие

Роль Сектора радиосвязи заключается в обеспечении рационального, справедливого, эффективного и экономичного использования радиочастотного спектра всеми службами радиосвязи, включая спутниковые службы, и проведении в неограниченном частотном диапазоне исследований, на основании которых принимаются Рекомендации.

Всемирные и региональные конференции радиосвязи и ассамблеи радиосвязи при поддержке исследовательских комиссий выполняют регламентарную и политическую функции Сектора радиосвязи.

Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

Политика МСЭ-R в области ПИС излагается в общей патентной политике МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК, упоминаемой в Резолюции МСЭ-R 1. Формы, которые владельцам патентов следует использовать для представления патентных заявлений и деклараций о лицензировании, представлены по адресу: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/ru>, где также содержатся Руководящие принципы по выполнению общей патентной политики МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК и база данных патентной информации МСЭ-R.

Серии Рекомендаций МСЭ-R

(Представлены также в онлайн-форме по адресу: <http://www.itu.int/publ/R-REC/ru>.)

Серия	Название
BO	Спутниковое радиовещание
BR	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
BS	Радиовещательная служба (звуковая)
BT	Радиовещательная служба (телевизионная)
F	Фиксированная служба
M	Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская служба и относящиеся к ним спутниковые службы
P	Распространение радиоволн
RA	Радиоастрономия
RS	Системы дистанционного зондирования
S	Фиксированная спутниковая служба
SA	Космические применения и метеорология
SF	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
SM	Управление использованием спектра
SNG	Спутниковый сбор новостей
TF	Передача сигналов времени и эталонных частот
V	Словарь и связанные с ним вопросы

Примечание. – Настоящая Рекомендация МСЭ-R утверждена на английском языке в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции МСЭ-R 1.

Электронная публикация
Женева, 2024 г.

© ITU 2024

Все права сохранены. Ни одна из частей данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких бы то ни было средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R ВТ.2163-0

Алгоритм объективных измерений для оценки яркости в телевидении большого динамического диапазона^{1, 2}

(Вопрос МСЭ-R 142-3/6)

(2023)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации описан алгоритм измерения для определения уровня изображения по его средней яркости, который может быть полезен для оценки яркости отдельных изображений. Другими показателями, основанными на уровне изображения, являются временной уровень изображения и реакция на уровень изображения, которые можно использовать при моделировании реакции зрительной системы человека на последовательность изображений.

Ключевые слова

Измерение видеоизображения, яркость, производство телевизионных программ, большой динамический диапазон, HDR, телевидение, HDR-TV, международный обмен программами

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a) что телевидение большого динамического диапазона (HDR-TV) обеспечивает чрезвычайно широкий динамический диапазон яркости изображения;
- b) что большие перепады яркости могут быть неожиданными для зрителей;
- c) что контроль яркости изображения способствует пониманию производимого на зрителя впечатления;
- d) что временная последовательность изображений влияет на адаптацию состояния зрительной системы человека;
- e) что в Рекомендации МСЭ-R ВТ.2100 указаны две формы HDR-TV – с перцептивным квантованием (PQ) и с гибридной гамма-логарифмической коррекцией (HLG) – и что ожидается производство программ в обоих форматах;
- f) что для эталонных дисплеев HLG обычно используется номинальная пиковая яркость 1000 кд/м²;
- g) что в таблице 3 Рекомендации МСЭ-R ВТ.2100 указаны эталонные условия окружающей среды;
- h) что существующие методы измерения видеоизображения, используемые в производстве телевизионных программ, не позволяют получить числовое значение, отражающее субъективную яркость изображения;
- i) что для облегчения оценки субъективной яркости видеопрограмм полезны стандартизованные методы измерения,

¹ Настоящая Рекомендация не является заменой руководства, содержащегося в Рекомендации МСЭ-R ВТ.1702, которое предназначено для защиты уязвимой части зрительской аудитории, страдающей светочувствительной эпилепсией и, следовательно, склонной к приступам, вызываемым мигающим светом, в том числе определенными типами мигающих телевизионных изображений.

² Возможно, эти алгоритмы придется пересмотреть после тестирования на более широком спектре движущихся изображений и с учетом спецификации измерений, которая в настоящее время находится в стадии разработки.

признавая,

что использование таких алгоритмов дополнит, а не заменит традиционный контроль сигналов,

рекомендует

1 использовать алгоритм измерения уровня изображения, приведенный в разделе 1, когда для облегчения производства программ и обмена ими требуется измерение субъективной яркости изображения с большим динамическим диапазоном, созданного в соответствии с Рекомендацией МСЭ-R ВТ.2100;

2 использовать алгоритм измерения временного уровня изображения, описанный в разделе 2, для оценки влияния последовательности изображений на адаптацию зрителя;

3 использовать алгоритм аппроксимации реакции глаза – алгоритм оценки реакции на уровень изображения, – описанный в разделе 3, который может быть полезен для оценки значимости изменений яркости в программе,

далее рекомендует

1 не использовать настоящую Рекомендацию в качестве инструмента регулирования яркости, ограничения действий операторов или ограничений при создании контента;

2 рассмотреть в МСЭ-R возможность скорейшего обновления и совершенствования настоящей Рекомендации из-за ограниченной проверки алгоритмов на движущихся изображениях.

1 Алгоритм измерения уровня изображения

В данном разделе описан алгоритм измерения уровня изображения (IL), который может быть полезен для оценки общей воспринимаемой яркости изображения. Алгоритм IL служит основой для других показателей, описанных в разделах 2 и 3 настоящей Рекомендации.

Входной информацией для алгоритма измерения IL является нелинейный сигнал $R'G'B'$ формата HLG или PQ в диапазоне значений [0:1] согласно Рекомендации МСЭ-R ВТ.2100.

Алгоритм состоит из четырех этапов:

- 1) преобразование в линейную яркость изображения;
- 2) расчет яркостной составляющей;
- 3) расчет средней яркости изображения;
- 4) перевод в логарифмические единицы.

Блок-схема алгоритма показана на рисунке 1.

РИСУНОК 1

Блок-схема алгоритма измерения уровня изображения



1.1 Преобразование в линейную яркость изображения

К сигналам HLG $R'G'B'_{\text{HLG}}$ применяется функция EOTF HLG, описанная в таблице 5 Рекомендации МСЭ-R ВТ.2100, с использованием значения 1,2 для γ , как указано в примечании 5f к таблице 5 Рекомендации МСЭ-R ВТ.2100 для дисплея с номинальной пиковой яркостью 1000 кд/м². Результирующий сигнал отражает линейную яркость изображения $R_D G_D B_D_{\text{HLG}}$ в диапазоне [0:1000] кд/м².

К сигналам PQ $R'G'B'_{\text{PQ}}$ применяется функция EOTF PQ, описанная в таблице 4 Рекомендации МСЭ-R ВТ.2100. Результирующий сигнал отражает линейную яркость изображения $R_D G_D B_D_{\text{PQ}}$ в диапазоне значений [0:10 000] кд/м².

В дальнейшем компонентный сигнал линейной яркости изображения обозначается $R_D G_D B_D$ независимо от формата исходного сигнала – HLG или PQ.

1.2 Расчет яркостной составляющей

Линейный сигнал яркости изображения Y_D рассчитывается с использованием следующего уравнения:

$$Y_D = 0,2627R_D + 0,6780G_D + 0,0593B_D.$$

Метод аппроксимации описан в Приложении 1.

1.3 Расчет средней яркости изображения

Затем вычисляется средняя яркость изображения \bar{Y}_D для видеокadra в единицах кд/м²:

$$\bar{Y}_D = \frac{1}{H \times V} \sum_{h=0}^{H-1} \sum_{v=0}^{V-1} Y_D(h, v),$$

где

$Y_D(h, v)$: линейная яркость отображаемого пикселя в горизонтальном положении h , вертикальном положении v ;

H : количество горизонтальных пикселей;

V : количество вертикальных пикселей.

1.4 Перевод в логарифмические единицы

Средняя яркость изображения в единицах кд/м² преобразуется в логарифмические единицы по основанию 2 со значением нормализации 1 кд/м².

ПРИМЕЧАНИЕ. – Средняя яркость изображения, равная 1 кд/м², дает нулевое значение IL:

$$IL = \log_2 \frac{\bar{Y}_D}{1}.$$

Предварительные исследования, касающиеся этого алгоритма, представлены в Приложении 2.

2 Алгоритм измерения временного уровня изображения

Просмотр последовательности изображений влияет на состояние адаптации человека-наблюдателя и, следовательно, на воспринимаемое воздействие уровня изображения. Временной уровень изображения (ТЛ)³ может быть полезен для оценки яркости изображения с течением времени. ТЛ рассчитывается следующим образом:

³ Алгоритм ТЛ проверен только при ограниченных условиях на изображениях с преимущественно статичным содержанием, таких, какие описаны в Приложении 4. Возможно, после тестирования на более широком спектре движущихся изображений алгоритм ТЛ придется пересмотреть.

$$TIL(t) = \begin{cases} IL(t) & \text{при } t = 0; \\ TIL(t-1) \left(1 - \frac{1}{\tau+1}\right) + IL(t) \left(\frac{1}{\tau+1}\right) & \text{при } t > 0, \end{cases}$$

где t – номер кадра, начиная с 0, а τ – характерное время спада, константа, которая устанавливается равной:

$$p(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } t = 0; \\ IL(t) - TIL(t-1) & \text{при } t > 0; \end{cases}$$

$$\tau = \begin{cases} 22 \frac{f}{24} & \text{при } p(t) \geq 0; \\ 800 \frac{f}{24} & \text{при } p(t) < 0, \end{cases}$$

где:

f : частота кадров видеоизображения (в герцах).

Вывод функциональной формы TIL приведен в Приложении 3, а способ выбора значений времени спада описан в Приложении 4.

3 Алгоритм оценки реакции на уровень изображения

Реакция на уровень изображения (ILR) используется для моделирования реакции зрительной системы человека на яркость изображения. Она может быть полезна для оценки непосредственного уровня раздражения зрителя, возникающего из-за изменений в уровне изображения, например при смене кадров. Она не моделирует снижение субъективного раздражения после изменения яркости. Тем не менее эта информация может быть полезна для создания измерительных приборов, которые в сочетании с другими мерами, указанными в этом документе, смогут моделировать такое снижение. Оно зависит как от яркости изображения, так и от уровня адаптации глаза. В эталонной среде, соответствующей Рекомендации МСЭ-R ВТ.2100, эту реакцию можно аппроксимировать с использованием величин IL и TIL следующим образом:

$$ILR = \frac{(2^{IL})^{n_c}}{(2^{IL})^{n_c} + (2^{TIL})^{n_c}},$$

где:

ILR : оценка реакции зрительной системы человека;

n_c : константа, равная 0,57.

Приложение 1 (информативное)

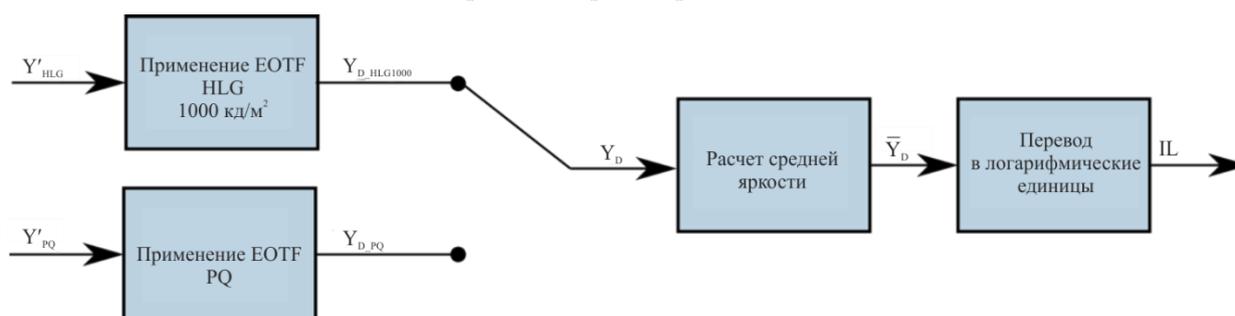
Аппроксимация яркости изображения для упрощения аппаратной реализации

В данном Приложении описан метод приближенного расчета компонента яркости изображения Y_D , который упрощает реализацию алгоритма IL, описанного в разделе 1. Этот метод может быть реализован в устройствах, используемых только в качестве наглядного пособия, когда аппаратные ресурсы ограничены. При использовании этой аппроксимации насыщенные цвета могут привести к более низким измеренным значениям. Устройства, использующие данный метод, не подходят для численного анализа значений IL, а следовательно, регистрация значений IL не требуется.

Блок-схема алгоритма аппроксимации представлена на рисунке 2. На вход поступает нелинейный сигнал яркости HLG или PQ Y' с диапазоном значений [0:1]. Если это сигнал IC_{7C_P} , то вместо Y' в приведенной ниже диаграмме можно использовать сигнал I .

РИСУНОК 2

Блок-схема алгоритма измерения приближенного значения ИЛ

**Преобразование в приближительную линейную яркость изображения⁴**

К сигналам HLG Y'_{HLG} , непосредственно к Y'_{HLG} , применяется функция EOTF HLG, описанная в таблице 5 Рекомендации МСЭ-R ВТ.2100, с использованием значения 1,2 для γ , как указано в примечании 5f к таблице 5 Рекомендации МСЭ-R ВТ.2100 для дисплея с номинальной пиковой яркостью 1000 кд/м². Результирующий сигнал аппроксимирует линейную яркость изображения Y_{D_HLG} в диапазоне значений [0:1000] кд/м².

Для сигналов PQ Y'_{PQ} функция EOTF PQ, приведенная в таблице 4 Рекомендации МСЭ-R ВТ.2100, применяется непосредственно к Y'_{PQ} . Результирующий сигнал аппроксимирует линейную яркость изображения Y_{D_PQ} в диапазоне значений [0:10 000] кд/м².

Аппроксимированный сигнал линейной яркости изображения обозначается Y_D , независимо от формата исходного сигнала – HLG или PQ.

Приближенное значение Y_D затем используется в остальных расчетах, описанных в пунктах 1.2 и 1.3.

Приложение 2 (информативное)

Объективные показатели измерения яркости в телевидении большого динамического диапазона

В данном Приложении приводится описание предварительных исследований, которые послужили основой для разработки алгоритма измерения уровня изображения, описанного в разделе 1. После обзора соответствующих работ описывается субъективный тест, в ходе которого были установлены значения, которые можно использовать в качестве данных по воспринимаемой яркости для набора тестовых изображений. Затем эти значения используются для проверки ряда потенциальных объективных показателей измерения яркости изображения.

Соответствующие работы

Существует обширный перечень работ по восприятию яркости и адаптации, и они описаны в Белой книге BBC 341 [1].

⁴ Следует отметить, что для точного расчета яркости изображения функции EOTF из Рекомендации МСЭ-R ВТ.2100 применяются к компонентам сигнала $R'G'B'$, а не к компоненту яркости, как описано здесь.

Эксперимент по установлению значений яркости тестовых изображений

Термин "яркость" (*brightness*) обозначает "степень, в которой участок поверхности кажется освещенным" ([2], с. 69). Его значение отличается от значения английского термина "*lightness*", (яркость; светлота), которое связано с кажущейся отражательной способностью объекта независимо от того, как он освещен ([2], с. 70). Яркость – это субъективная величина, которую невозможно измерить напрямую, поэтому разработана методика субъективных испытаний для создания набора достоверных измерений яркости. Цель состоит в том, чтобы создать объективный показатель яркости, который максимально точно соответствует субъективным результатам и основан на значениях яркости изображения.

Испытуемых просили отрегулировать яркость серого экрана так, чтобы она соответствовала общей воспринимаемой яркости тестового изображения. Яркость серого экрана известна и может использоваться как числовое значение, отражающее яркость изображения. Испытуемые могли свободно переключаться между тестовым изображением и серым экраном, и время не ограничивалось.

Тестовое изображение и серый экран отображались на дисплее SIM2 HDR47E с использованием калиброванного режима LogLUV. Уровни яркости экрана варьировались от 0 до 4000 кд/м², при этом 400 последовательных значений соответствовали экспоненциальной функции, так что размер шага составлял $3,9 \times 10^{-10}$ кд/м² при черном цвете и 50 кд/м² в верхнем конце шкалы. Как и все ЖК-дисплеи при полноэкранный одноцветном изображении SIM2 не в состоянии точно воспроизводить вводимую воспринимаемую яркость, особенно при высоких уровнях яркости изображения. Перед представлением результатов были записаны фактические значения яркости экрана для входных значений уровня яркости экрана, изменявшихся с интервалом 10 кд/м² и предполагаемые значения яркости серого экрана были поставлены в соответствие этим измеренным значениям (при необходимости интерполированным). Стена за экраном освещалась двумя регулируемые светодиодными источниками света, так что свет, отраженный от стены, имел яркость белого цвета D65 5 кд/м². Источники света располагались за экраном и были обращены к стене, чтобы свести к минимуму попадание света непосредственно на экран. Других источников света в помещении не было. Помещение, оборудованное для испытаний, показано на рисунке 3.

РИСУНОК 3

Помещение, оборудованное для испытаний



РИСУНОК 4

Изображения, использовавшиеся для испытаний



Примечание к рисунку 4. – Изображения с 1 по 12⁵ взяты из [3], изображение 13 из [4]⁶, а изображения 14 и 15 созданы Отделом исследований и разработок ВВС.

Вход LogLUV дисплея SIM2 не имеет регулировки яркости, поэтому для калибровки уровня черного нельзя использовать обычный сигнал PLUGE. Для определения требуемого смещения использовался набор специально сгенерированных тестовых сигналов, включающих суб- и супер-черный цвет в диапазоне уровней черного, и это смещение добавлялось к тестовым изображениям перед их демонстрацией. Смещение уровня черного оказалось равным $0,005 \text{ кд/м}^2$. Это ниже, чем можно было бы ожидать, если бы источники света располагались перед, а не за экраном.

⁵ Эти изображения воспроизводятся с разрешения Марка Фэйрчайлда.

⁶ Это изображение воспроизводится с разрешения Высшей школы средств массовой информации в Штутгарте.

В этом исследовании использовались 15 изображений, которые показаны на рисунке 4. Первые 12 изображений были взяты из работы Марка Фэйрчайлда "HDR Photographic Survey" [3], к ним было добавлено одно изображение (№ 13), предоставленное Высшей школой средств массовой информации в Штутгарте [4], и два изображения, созданных Отделом исследований и разработок BBC (№ 14 и 15). Поскольку динамический диапазон исходных изображений был больше предполагаемого для HDR-телевидения, изображения масштабировались, чтобы выглядеть эстетично (по мнению небольшого числа зрителей-специалистов) при меньшем динамическом диапазоне. Это эквивалентно настройке диафрагмы фотокамеры. В тестовый набор вошли яркие и темные изображения, а также несколько изображений со светлыми и затененными областями. Изображения преобразовывались в основные цвета согласно Рекомендации МСЭ-R ВТ.2100/ВТ.2020 и демонстрировались с разрешением 1920×1080 пикселей в соответствии с максимальным разрешением дисплея.

Каждое изображение отображалось при четырех пиковых уровнях яркости дисплея – 500, 1000, 2000 и 4000 кд/м² – с использованием метода регулировки яркости в зависимости от картины. Применялась гамма-функция, соответствующая пиковой яркости дисплея, согласно примечанию 5f к таблице 5 Рекомендации МСЭ-R ВТ.2100. Это просто метод расширения диапазона яркости, используемого в тестах, и он не ограничивает применимость результатов к системам, зависящим от картины.

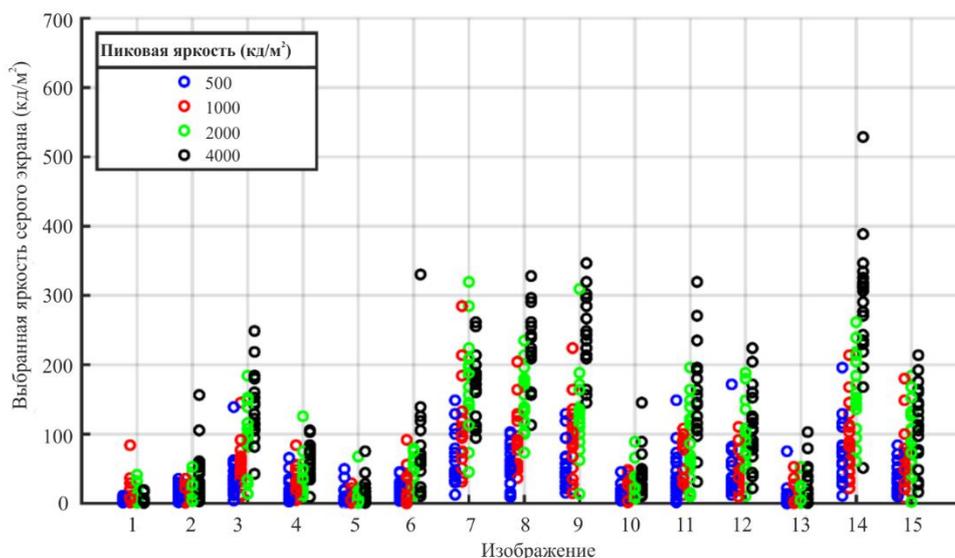
Испытуемые располагались на расстоянии 1,9 м от дисплея, что соответствует 3,2-кратной высоте экрана. Перед тестом каждого испытуемого проверяли на нормальную остроту зрения, а затем давали письменные инструкции. В начале теста были предоставлены два обучающих и три фиктивных изображения. Результаты по обучающим и фиктивным изображениям отбрасывались. Изображения представлялись каждому испытуемому в случайном порядке, при этом были приняты меры к тому, чтобы одно и то же изображение (с разной яркостью) никогда не появлялось дважды подряд. Тест выполнили 20 испытуемых.

Результаты эксперимента по установлению значений яркости тестовых изображений

На рисунке 5 показана индивидуальная реакция всех 20 испытуемых на каждое изображение при каждом значении пиковой яркости дисплея. Следует отметить, что даже при разных пиковых уровнях яркости дисплея не всем изображениям могут соответствовать разные субъективные уровни яркости. Например, тестовое изображение 1 (см. рисунок 4) в основном темное с несколькими яркими бликами. При увеличении яркости дисплея наибольшая субъективная разница наблюдается в воспринимаемой яркости светлых участков, поэтому изменение пиковой яркости дисплея может не повлиять на общую яркость этого изображения, если уровень небольшой области светлых участков не важен для восприятия. Это именно тот эффект, который необходимо исследовать, чтобы разработать эффективный показатель яркости. Тем не менее результаты показывают общую тенденцию к тому, что изображения кажутся ярче при увеличении пиковой яркости дисплея и что в тестовом наборе наблюдается разброс ярких и темных изображений.

РИСУНОК 5

Выбранные отдельными испытуемыми уровни яркости серого экрана в соответствии с изображением и пиковой яркостью дисплея. Каждый кружок соответствует оценке данного изображения одним субъектом



Объективные показатели

Для целей данного исследования разработаны модели, которые связывают значения яркости отображаемых пикселей со значениями общей воспринимаемой яркости, полученными в ходе субъективных тестов. В конечном счете модель, если она будет использоваться для контроля сигнала, должна будет работать со значениями сигнала, а не с отображаемыми уровнями яркости, но на данном этапе она остается независимой от формата сигнала, поэтому ее можно применять к любому HDR-изображению.

Тестовые изображения сохранялись как изображения с гибридной гамма-логарифмической коррекцией $Y'C_b'C_r'$ с цветовой субдискретизацией 4:2:2. После увеличения разрешения компонентов цветоразностного представления и преобразования в $R'G'B'$ рассчитывались значения яркости изображения в соответствии с таблицей 5 Рекомендации МСЭ-R ВТ.2100. Сначала исключалась оптоэлектрическая передаточная функция HLG для определения сигналов линейной яркости картины $R_S G_S B_S$, затем применялись гамма-функция и масштабирование в соответствии с пиковой яркостью дисплея для определения цветových компонентов дисплея $R_D G_D B_D$. Наконец, по отображаемым цветovým компонентам рассчитывались значения яркости изображения с использованием цветových уравнений согласно Рекомендациям МСЭ-R ВТ.2100/ВТ.2020.

Следующие модели выдают числовое значение общей воспринимаемой яркости по значениям яркости пикселей тестовых изображений. Отображаемая яркость конкретного пикселя определяется как $(Y_D(i, j))$, где i и j – индексы пикселей, причем $i \in 0:M - 1$ и $j \in 0:N - 1$. Для наших изображений $M = 1080$ и $N = 1920$.

- 1) Средняя яркость дисплея

$\frac{1}{MN} \sum_i \sum_j Y_D(i, j)$. В качестве базовой характеристики рассчитаем среднее значение яркости всех отображаемых пикселей.

- 2) Среднее по \log_{10} значений яркости дисплея

$\frac{1}{MN} \sum_i \sum_j \log_{10}(Y_D(i, j))$. Согласно Фечнеру [5].

- 3) Среднее значение PQ обратной величины EOTF яркости дисплея

$\frac{1}{MN} \sum_i \sum_j \text{EOTF}^{-1}(Y_D(i, j))$, при значении EOTF^{-1} , определенном в таблице 4 Рекомендации МСЭ-R ВТ.2100.

- 4) Среднее значение яркости дисплея, возведенное в степень
 $\frac{1}{MN} \sum_i \sum_j (Y_D(i, j))^p$. Согласно Стивенсу [6]. Здесь проверяются значения от $p = 0,2$ до $p = 1$.
- 5) Средняя яркость по CIE 1976
 $\frac{1}{MN} \sum_i \sum_j L^*(Y_D(i, j))$, при значении L^* , определенном в CIE [7], включая линейный участок при низких уровнях яркости. В качестве эталонного белого используются значения отображенной яркости, соответствующие 75%-му уровню сигнала, поскольку он определен как эталонный уровень для графики в формате HLG HDR. Это уровни 120, 203, 344 и 581 кд/м² соответственно для пиковых уровней воспринимаемой яркости 500, 1000, 2000 и 4000 кд/м².
- 6) Средневзвешенная яркость дисплея
 $\frac{1}{MN} \sum_i \sum_j Y_D(i, j) \cdot \cos \theta_{ij} / \theta_{ij}^2$, где θ_{ij} – угол зрения между пикселем (i, j) и центром экрана с минимальным значением $0,75^\circ$. Этот параметр соответствует работе Муна и Спенсера [8]. В используемой здесь форме предполагается, что взгляд зрителя направлен в центр экрана и всем пикселям соответствует приблизительно один и тот же угол зрения, если опустить константы, не влияющие на коэффициенты корреляции.
- 7) Среднее значение в центре экрана
 $\frac{4}{MN} \sum_{i=M/4}^{3M/4} \sum_{j=N/4}^{3N/4} Y_D(i, j)$. Упрощенная версия алгоритма взвешивания Муна и Спенсера: вычисляется средняя яркость только пикселей, расположенных в центральной четверти экрана.
- 8) Процентили
 n -й процентиль, P_n – это уровень яркости, ниже которого находятся n процентов уровней яркости всех пикселей. Это соответствует распределению уровней яркости дисплея. Проверяются процентили от P_{10} до P_{100} .
- 9) Диапазоны процентилей
Вычисляется межквартильный размах $P_{75}-P_{25}$, и разность между 90-м и 10-м процентилями $P_{90} - P_{10}$. Это отражает разброс значений отображаемой яркости изображения.
- 10) Среднее значение в указанном диапазоне
Вычисляется средняя яркость дисплея только для тех значений, которые располагаются между P_{25} и P_{75} . Также проверяется диапазон от P_{10} до P_{90} .

В качестве истинных значений яркости для оценки моделей использовались средние выбранные уровни серого для 60 тестовых изображений (15 изображений при четырех пиковых значениях воспринимаемой яркости, см. рисунок 4). Приводятся коэффициент корреляции Пирсона и коэффициент ранговой корреляции Спирмена между каждой моделью и истинным значением.

Корреляция между объективными показателями и субъективными результатами

Коэффициенты корреляции Пирсона и коэффициенты ранговой корреляции Спирмена для всех изученных показателей яркости приведены в таблице 1. Результаты также представлены графически на рисунках 6 и 7.

Самый простой показатель – средняя отображаемая яркость (показатель 1) – совпадает очень хорошо: коэффициент корреляции Пирсона составляет чуть менее 0,96. Его характеристика показана на левом графике на рисунке 8. Различные методы нелинейного масштабирования показателей 2–5 приводят только к отклонению данных от прямой линии показателя 1, как продемонстрировано для показателя 5 с показателем степени 0,33 на правом графике на рисунке 8, где лучше явно подходит кривая линия. Единственным исключением является возведение значений яркости пикселей перед усреднением в некоторую степень от 0,8 до 0,9 (см. рисунок 7 слева), что дает очень незначительное улучшение по сравнению с показателем 1.

Средневзвешенная яркость дисплея (показатель 6), которая зависит от фиксации взгляда зрителя, работает плохо, и среднее значение в центре экрана (показатель 7) также гораздо менее эффективно, чем среднее по всем значениям. Это показывает, что пиксели вблизи края экрана вносят важный вклад в общую воспринимаемую яркость.

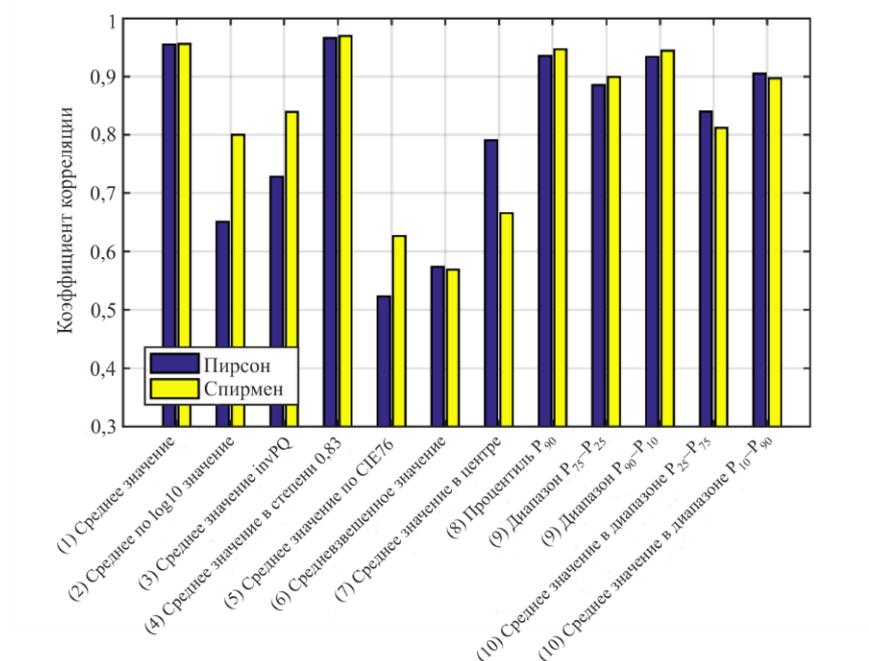
Нижние процентиля (показатель 8) весьма неэффективны, но более высокие хорошо коррелируют с результатами субъективных тестов. Это наводит на мысль о том, что распределение яркости самых темных участков изображения не сильно влияет на общую воспринимаемую яркость, в отличие от уровня яркости наиболее ярких участков. Корреляция снижается для процентилей выше 90-го, что означает, что очень небольшие яркие области оказывают меньшее влияние на общую воспринимаемую яркость.

Диапазоны процентилей (показатель 9) действуют аналогично процентилю, соответствующему верхнему пределу диапазона, то есть корреляция для диапазона $P_{90}-P_{10}$ аналогична корреляции только для P_{90} , а корреляция для диапазона $P_{75}-P_{25}$ находится между значениями для P_{70} и P_{80} . Оба показали достаточно хорошую корреляцию с субъективными результатами. Все наши тестовые изображения содержали темные области, поэтому диапазоны процентилей в данном случае не более информативны, чем отдельные процентиля.

Среднее значение в указанном диапазоне (показатель 10) также работает относительно хорошо. Более высокая корреляция обусловлена более широким диапазоном, то есть диапазоном, который ближе всего к показателю 1.

РИСУНОК 6

Коэффициенты корреляции для всех изучаемых показателей.
Параметры, дающие наибольшую корреляцию, используются для показателей 4 и 8



Предлагаемый показатель яркости

РИСУНОК 7

Коэффициенты корреляции для показателя 4 – среднее значение яркости отображаемых пикселей, возведенных в степень от 0,2 до 1 (слева); и коэффициенты корреляции для показателя 8, процентиля 10–100 значений яркости отображаемых пикселей (справа)

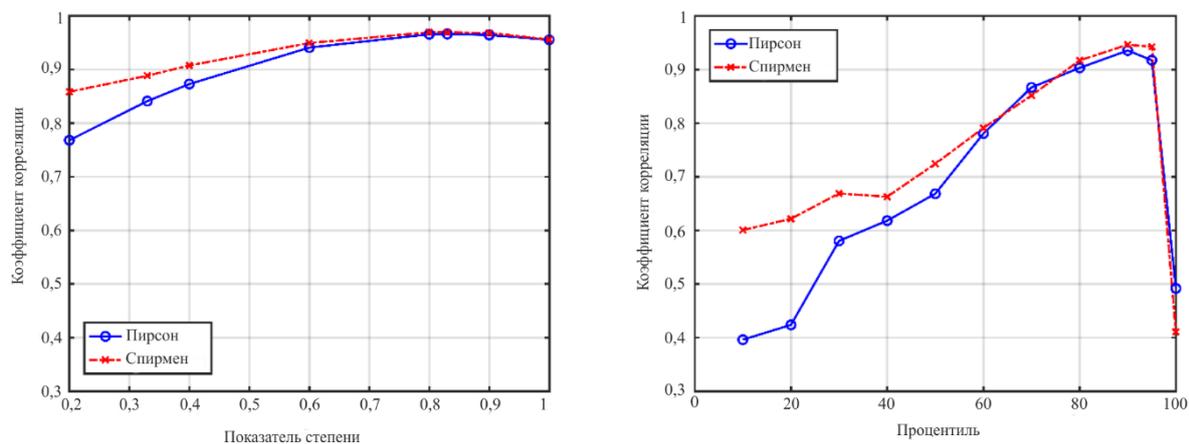


ТАБЛИЦА 1

Коэффициенты корреляции Пирсона и ранговой корреляции Спирмена для изучаемых показателей яркости.
Наилучшая корреляция в каждом разделе таблицы выделена жирным шрифтом

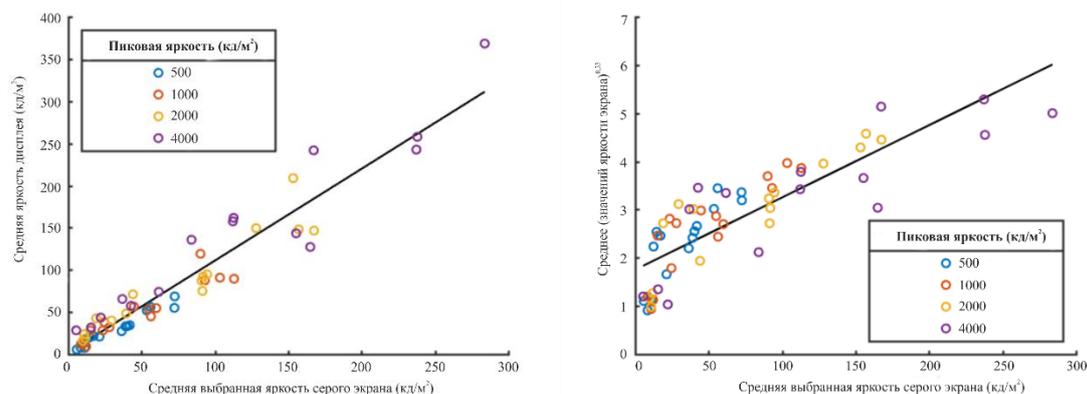
Показатель	Значение параметра (в соответствующих случаях)	Коэффициент корреляции Пирсона	Коэффициент ранговой корреляции Спирмена
1) Средняя яркость дисплея	–	0,955378	0,955877
2) Среднее по log10 значений яркости дисплея	–	0,651608	0,800111
3) Среднее значение PQ обратной величины EOTF яркости дисплея	–	0,728708	0,839344
4) Средняя яркость по CIE 1976	–	0,523273	0,626341
5) Среднее значение яркости дисплея, возведенное в степень	0,2	0,767964	0,858405
	0,33	0,841025	0,888358
	0,4	0,872807	0,907530
	0,6	0,940758	0,949264
	0,8	0,965687	0,969492
	0,83	0,966131	0,969214
6) Средневзвешенная отображаемая яркость	–	0,573798	0,568769
7) Среднее значение в центре экрана	–	0,791089	0,666296
8) Процентиля	P_{10}	0,395950	0,600389
	P_{20}	0,423570	0,621506
	P_{30}	0,580292	0,668797
	P_{40}	0,617995	0,662573
	P_{50}	0,668203	0,724034

ТАБЛИЦА 2 (окончание)

Показатель	Значение параметра (в соответствующих случаях)	Коэффициент корреляции Пирсона	Коэффициент ранговой корреляции Спирмена
	P_{60}	0,780425	0,790886
	P_{70}	0,866544	0,851570
	P_{80}	0,903016	0,916921
	P_{90}	0,935327	0,946374
	P_{95}	0,917317	0,942317
	P_{100}	0,491586	0,410593
9) Диапазоны перцентилей	$P_{75}-P_{25}$	0,885345	0,899194
	$P_{90}-P_{10}$	0,934097	0,944540
10) Среднее значение в указанном диапазоне	$P_{25}-P_{75}$	0,839611	0,811892
	$P_{10}-P_{90}$	0,905243	0,89686

РИСУНОК 8

Показатель 1 – средняя яркость дисплея (слева) и показатель 5 – среднее значение яркости дисплея, возведенное в степень 0,33 (справа); каждый график построен относительно средней выбранной яркости серого экрана (используется в качестве меры субъективной яркости, подробности см. в Приложении 2) для каждого тестового изображения



Заключение

Исследованы десять классов объективных показателей яркости, которые связывают значения яркости отображаемых пикселей с общей воспринимаемой яркостью изображения. Предыдущие измерения общей воспринимаемой яркости набора изображений HDR позволили определить эталонные данные для оценки изучаемых показателей.

Самым эффективным показателем служит средняя величина значений яркости отображаемых пикселей, предварительно возведенных в степень 0,83, но он лишь незначительно лучше более простого показателя, вычисляемого непосредственно как среднее значение яркости отображаемых пикселей. Улучшение, обеспечиваемое предварительным возведением значений в степень, весьма незначительно и, вероятно, находится в пределах экспериментальной погрешности, поэтому для применений в реальном времени предпочтителен более простой метод. Высокая корреляция 0,96 предполагает, что этот простой показатель станет эффективной основой для контроля яркости.

Справочные документы

- [1] Noland, K.C., Pindoria M. and Cotton, A., "Modelling Brightness Perception for High Dynamic Range Television" Research & Development White Paper, 2019, pp. 1, 2. Available: <http://downloads.bbc.co.uk/rd/pubs/whp/whp-pdf-files/WHP341.pdf>
- [2] Hunt, R. W. G., "The Reproduction of Colour in Photography, Printing and Television", 4th ed. Fountain Press, 1987.
- [3] Fairchild, Mark, "The HDR Photographic Survey", website, <http://markfairchild.org/HDR.html>
- [4] Fröhlich, J., Grandinetti, S., Eberhardt, B., Walter, S., Schilling, A., and Brendel, H., "Creating cinematic wide gamut HDR-video for the evaluation of tone mapping operators and HDR-displays", Proc. SPIE 9023, Digital Photography X, 90230X, 7 March 2014. Images available online at <https://www.hdm-stuttgart.de/vmlab/hdm-hdr-2014/>
- [5] Fechner, G. T., "Elemente der Psychophysik", Breitkopf und Härtel, 1860.
- [6] Stevens, S. S., "To Honour Fechner and Repeal His Law", Science, vol. 133, no. 3446, pp. 80-86, 1961.
- [7] Commission Internationale de l'Eclairage, "CIE 1976 L*u*v* colour space", 2014. [Online] Available: <https://cie.co.at/eilv/159>
- [8] Moon, P. and Spencer, D. E., "The Visual Effect of Non-Uniform Surrounds", J. Optical Soc. America, vol. 25, no. 3, pp. 233-248, 1945.

Приложение 3 (информативное)

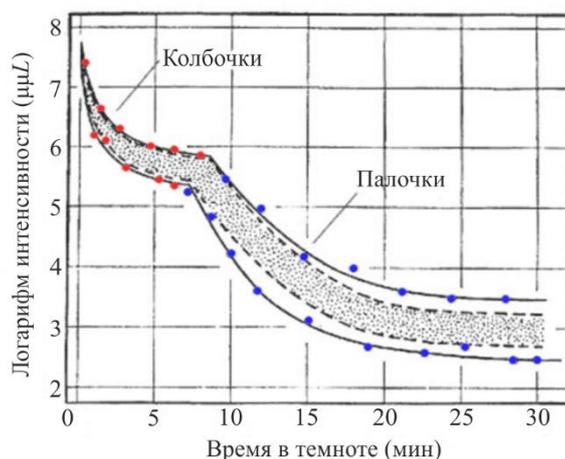
Основа функциональной формы "временной уровень изображения"

Введение

Зрение человека со временем адаптируется к видимой картине. Такая адаптация в некотором смысле зависит от картины, которую наблюдатель видел в недавнем прошлом. Давно известно, что при воздействии света фиксированной яркости в течение фиксированного времени уровень адаптации наблюдателя зависит от произведения этой яркости на продолжительность воздействия (то есть от общей энергии, воздействующей на наблюдателя) [1], [2], [3]. Если после полной адаптации к такому фиксированному уровню яркости световой раздражитель исчезает, то следует темновая адаптация, полный эффект которой достигается примерно через 30 минут. Кривая темновой адаптации в зависимости от времени представлена на рисунке 9.

РИСУНОК 9⁷

Кривая темновой адаптации



Примечание к рисунку 9. – Заштрихованная область соответствует данным по 80% группы испытуемых. (Данные Хекта и Мандельбаума из работы: Pirenne M. H., Dark Adaptation and Night Vision. Chapter 5. В: Davson, H. (ed), The Eye, vol 2. London, Academic Press, 1962.)

Видно, что палочки и колбочки глаза адаптируются по схожим кривым, но в разных световых режимах. В фовеолярной зоне находятся только колбочки, поэтому часть кривой, определяемая палочками, отсутствует. Как упоминалось выше, кривые темновой адаптации зависят от яркости, к которой до этого адаптировался глаз. Кроме того, на темновую адаптацию влияет продолжительность адаптации к этому уровню яркости. Чем короче период предварительной адаптации к яркости, тем быстрее происходит адаптация к темноте. Это говорит о том, что воздействие яркости задолго до текущего состояния адаптации оказывает меньшее влияние на адаптацию.

Можно предположить, что текущее состояние адаптации наблюдателя, просматривающего видеоизображение, можно аппроксимировать путем интегрирования взвешенных значений яркости прошлых видеокadres, когда давним кадрам присваивается меньший вес. Эквивалентом с точки зрения обработки изображений будет интегрирование каждого отдельного пикселя по определенному количеству предыдущих кадров. Однако такое интегрирование эквивалентно применению к каждому пикселю временного фильтра нижних частот. Таким образом, в принципе можно определить состояние адаптации зрительной системы наблюдателя, просматривающего видеоизображение, путем свертки фильтра нижних частот с видеосигналом.

Для такой свертки требуются большие вычислительные ресурсы, к тому же результат можно получить гораздо более эффективным и биологически правдоподобным способом. Для этого можно точно смоделировать реакцию нейронов в (человеческом) мозге с помощью (обобщенных) моделей "интегрирование и срабатывание с утечками" (leaky integrate-and-fire). Для нейронов характерна связь между мембранными токами на входе и мембранным напряжением на выходе⁸. Известно, что нейроны теряют некоторый потенциал в зависимости от сопротивления своей мембраны, так что в момент времени t ток возбуждения $I(t)$ связан с напряжением мембраны V_m следующим образом:

$$I(t) = \frac{V_m(t)}{R_m} + C_m \frac{dV_m(t)}{dt},$$

⁷ Этот рисунок взят с веб-страницы <https://webvision.med.utah.edu/book/part-viii-gabac-receptors/light-and-dark-adaptation/>.

⁸ https://en.wikipedia.org/wiki/Biological_neuron_model#Leaky_integrate-and-fire

где:

R_m : сопротивление мембраны;

C_m : емкость нейрона.

По сути это интегратор с утечкой⁹. Результат можно умножить на R_m и ввести постоянную времени мембраны $\tau_m = R_m C_m$, что дает¹⁰

$$\tau_m \frac{dV_m(t)}{dt} = -V_m(t) + R_m I(t).$$

Разумно предположить, что в момент времени $t = 0$ мембранное напряжение имеет определенное постоянное значение, то есть $V_m(0) = V$, и что в любой момент времени после этого входной сигнал отсутствует, то есть $I(t) = 0$ для $t > 0$. Это эквивалентно тому, что нейрон начинает адаптироваться к отсутствию входной информации. Например, для фоторецептора это тот случай, когда начинается темновая адаптация, но следует отметить, что данный процесс не уникален для фоторецепторов. Результирующим решением приведенного выше уравнения в замкнутой форме будет:

$$V_m(t) = V e^{\frac{-t}{\tau_m}} \quad \text{при } t > 0.$$

Видно, что это уравнение действительно качественно моделирует кривые темновой адаптации, приведенные на рисунке 9. Следует также отметить, что это уравнение по существу эквивалентно модели, предложенной Кроуфордом в 1947 году [4], [5]. Было установлено, что интегрирование с утечкой является подходящей моделью адаптивного поведения нейронов, участвующих в зрении человека.

Для значений t , приближающихся к 0, производная вышеуказанной функции стремится к $\frac{-V}{\tau_m}$, так что начальную скорость изменения можно регулировать с помощью параметра τ_m . Чтобы прийти к форме, эффективной с точки зрения вычислительных ресурсов, перепишем приведенное выше дифференциальное уравнение следующим образом:

$$\tau_m (V_m(t) - V_m(t-1)) = -V_m(t) + R_m I(t),$$

так что

$$(\tau_m + 1)V_m(t) - \tau_m V_m(t-1) = R_m I(t),$$

что приводит к формуле:

$$V_m(t) = \frac{\tau_m}{\tau_m + 1} \left(V_m(t-1) + \frac{I(t)}{C_m} \right).$$

Структура этого уравнения предполагает, что выходной сигнал нейрона V_m в момент времени t является функцией выходного сигнала нейрона в момент времени $t-1$, а также входного сигнала I в момент времени t .

В целях реализации этой модели в качестве интегратора с утечкой, который можно применять к изображениям или значениям, полученным из изображений, сопротивление мембраны R_m можно установить равным 1, так что

$$V_m(t) = \frac{\tau_m}{\tau_m + 1} \left(V_m(t-1) + \frac{I(t)}{\tau_m} \right).$$

Чтобы применить эту модель в условиях телевизионного вещания, предпочтительнее использовать один уровень адаптации для каждого кадра, а не для каждого пикселя. Этого можно достичь, заметив, что установившуюся адаптацию $L_a(t)$ кадра t можно аппроксимировать некоторой средней яркостью кадра, например уровнем изображения (ИЛ). Тогда состояние адаптации во времени $L_T(t)$ определяется следующим образом:

$$L_T(t) = \frac{\tau_m}{\tau_m + 1} \left(L_T(t-1) + \frac{L_a(t)}{\tau_m} \right).$$

⁹ https://en.wikipedia.org/wiki/Leaky_integrator

¹⁰ <https://neurondynamics.epfl.ch/online/Ch1.S3.html>

Этот метод дает тот же результат, что и временной фильтр нижних частот, но без сложных вычислений, связанных с подобными операциями фильтрации. Поэтому он включен в качестве меры адаптации зрения человека к движущемуся изображению.

Приведенное выше уравнение можно преобразовать следующим образом:

$$L_T(t) = L_T(t-1) \left(1 - \frac{1}{\tau_m+1}\right) + L_a(t) \left(\frac{1}{\tau_m+1}\right).$$

Справочные документы

- [1] F. A. Mote and A. J. Riopelle. The effect of varying the intensity and the duration of preexposure upon foveal dark adaptation in the human eye. *J. comp. physiol. Psychol.*, pp. 46(1):49-55, 1953.
- [2] Ledda, Patrick, Luis Paulo Santos, and Alan Chalmers. "A local model of eye adaptation for high dynamic range images". In *Proceedings of the 3rd international conference on Computer graphics, virtual reality, visualisation and interaction in Africa*, pp. 151-160. ACM, 2004.
- [3] Mote, F. A., and A. J. Riopelle. "The effect of varying the intensity and the duration of preexposure upon foveal dark adaptation in the human eye". *The Journal of general physiology* 34, No. 5 (1951): pp. 657-674.
- [4] Crawford, B. H. "Visual adaptation in relation to brief conditioning stimuli". *Proc. R. Soc. Lond. B* 134, No. 875 (1947): pp. 283-302.
- [5] Pianta, Michael J., and Michael Kalloniatis. "Characterisation of dark adaptation in human cone pathways: an application of the equivalent background hypothesis". *The Journal of physiology* 528, No. 3 (2000): pp. 591-608.

Приложение 4 (информативное)

Проверка постоянной времени на временном уровне изображения

Введение

В данном Приложении описывается исследование, проведенное в целях изучения подходящего значения τ для алгоритма оценки времени спада, описанного в разделе 2.

Субъективное тестирование

Компания Dolby Laboratories разработала набор субъективных тестов. Новизна этого эксперимента заключается в изучении субъективной толерантности к перепадам яркости в течение времени. Проводились два вида экспериментов для оценки зрительной реакции на переходы от яркого к темному и обратно к яркому и от темного к яркому и обратно к темному. В первом случае наблюдателям сначала показывали яркое изображение в течение 10 секунд, затем в течение разного времени им демонстрировали темное изображение и, наконец, возвращали яркое изображение на 7 секунд. Во втором случае, наоборот, сначала наблюдателям показывали темное изображение в течение 10 секунд, затем яркое в течение разного времени и, наконец, возвращали темное изображение на 7 секунд. В таблице 2 указана разная продолжительность демонстрации промежуточного изображения, которая использовалась в экспериментах обоих видов. Перед экспериментом проводилась серия предварительных тестов для определения оптимальной продолжительности демонстрации, используемой для эксперимента каждого вида.

ТАБЛИЦА 2

Продолжительность времени адаптации, использованная в эксперименте

Вид эксперимента	Продолжительность демонстрации промежуточного изображения, в секундах
Яркое–темное–яркое	0,5; 5; 10; 25; 40; 60; 90; 120; 150
Темное–яркое–темное	0,5; 2; 5; 10; 15; 20; 30; 60

После представляющего интерес перехода (от промежуточного изображения к конечному) испытуемых просили оценить свои впечатления. Оценки и терминология, связанная со шкалой ухудшений, приведены в таблице 3. Каждый термин, обозначающий степень боли/раздражения, имеет два значения для добавления градации. Кроме того, в тестах двух видов используются разные формулировки, отражающие чувства наблюдателя после перепада яркости.

ТАБЛИЦА 3

Шкала ухудшений, используемая для ранжирования перехода в экспериментах обоих видов

Оценка	Терминология – от яркого к темному и обратно к яркому	Терминология – от темного к яркому и обратно к темному
1; 1,5	Болезненно	Раздражающе
2; 2,5	Особенно болезненно	Особенно раздражающе
3; 3,5	Слегка болезненно	Слегка раздражающе
4	Не болезненно	Не раздражающе

Субъективными участниками этого эксперимента стали 17 зрителей-специалистов и неспециалистов. Использовалась система лазерного проектора Christie 4K 6P в условиях просмотра, соответствующих Рекомендации МСЭ-R ВТ.2100, при внешнем освещении яркостью 5 кд/м². Лазерный проектор был откалиброван на максимальную яркость 1000 кд/м² при измеренном уровне черного 0,0004 кд/м². Изображения располагались таким образом, чтобы составить горизонтальный угол в 3,2 высоты изображения относительно положения наблюдателя. Сигнал изображения передавался через стандартный цифровой интерфейс (SDI) после кодирования с помощью электрооптической передаточной функции PQ.

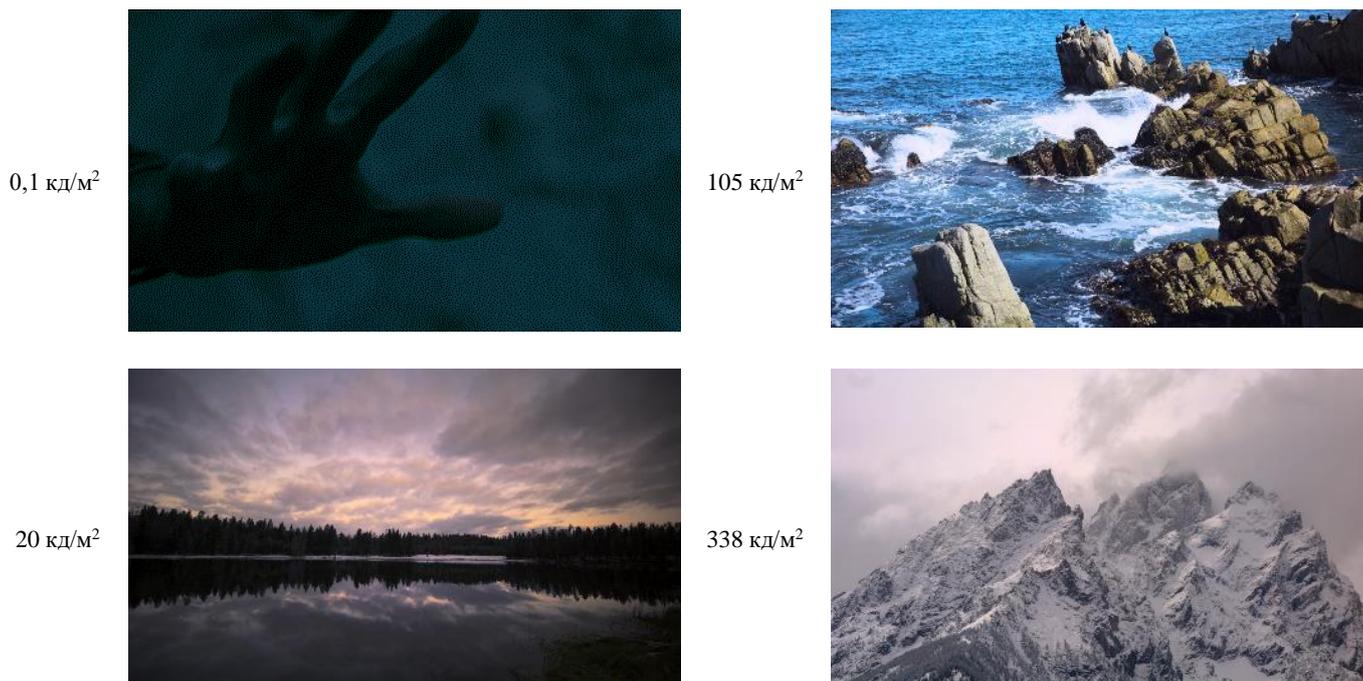
Тестовые изображения

В исследовании использовались всего четыре изображения (показаны на рисунке 10). Одно из них служило темным изображением, а три других – яркими изображениями разного уровня. Процедура тестирования повторялась с каждым из ярких изображений. Все изображения подвергались тональному преобразованию для отображения в пределах диапазона яркости проектора. Темное изображение было создано компанией Dolby Laboratories, Inc. (Dolby), а три ярких были лицензированы ею у компании Spears & Munsil¹¹. Изображения вместе с вычисленными средними значениями яркости показаны на рисунке 1. Средние значения яркости экрана рассчитывались с использованием алгоритма измерения уровня изображения, описанного в разделе 1.

¹¹ Spears & Munsil Ultra HD Benchmark (2023). <https://www.biaslighting.com/products/spears-munsil-ultra-hd-benchmark-2023>

РИСУНОК 10

Тестовые изображения с указанными средними значениями яркости экрана на проекторе 1000 кд/м²



Результаты испытаний

В ходе экспериментов двух видов оценивались три разных ярких изображения для проверки реакции на переход к изображениям с разной средней яркостью. Это делалось для того, чтобы показать, как меняется средняя субъективная оценка (MSS) в зависимости от величины перепада яркости и с течением времени адаптации.

На рисунке 11 показаны средние оценки и 95%-е доверительные интервалы для трех изображений в девяти испытаниях на время адаптации. Оценка "4" указывает на то, что переход не вызывает боли в глазах или субъективного раздражения, а "2" или более низкая оценка – на заметную боль в глазах или раздражение.

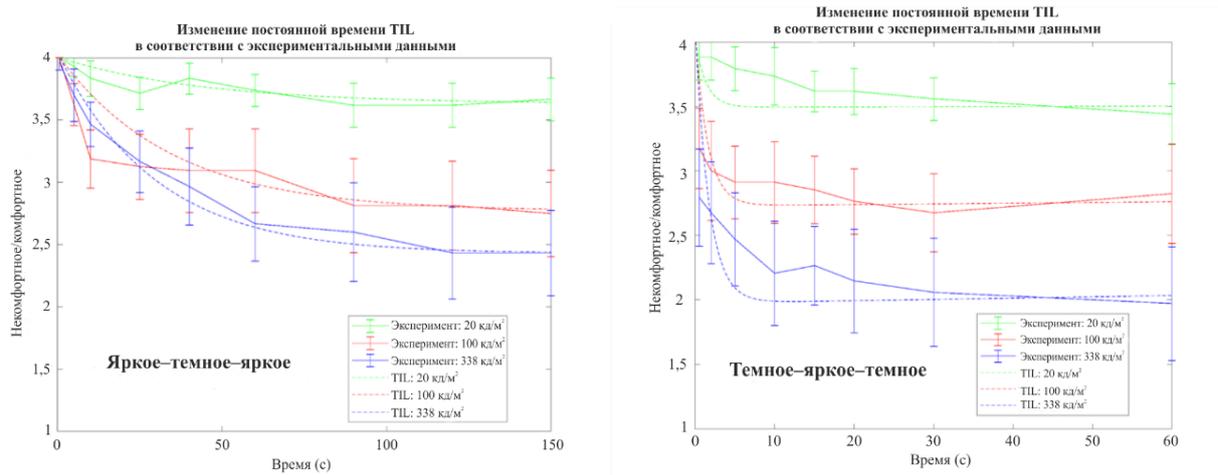
Чтобы подобрать подходящее значение τ для уравнения TIL, необходимо связать время адаптации с результатами MSS. Близким приближением к субъективному впечатлению является ILR, определенная в разделе 3.

Поэтому после преобразования средней яркости экрана в уровень изображения применялись уравнения TIL с разными значениями τ для оценки уровня адаптации к темному изображению после первоначального десятисекундного воздействия яркого изображения и разных периодов адаптации. Когда для каждой комбинации яркого изображения и периода адаптации были получены оценки TIL, рассчитывалось значение ILR. Затем полученные значения реакции масштабировались таким образом, чтобы они отражали диапазон MSS, охватываемый соответствующими значениями яркости. Это осуществлялось с помощью стандартной процедуры нормализации и масштабирования диапазона.

На рисунке 11 эти значения MSS, оценивающие TIL, с оптимальным значением τ показаны пунктирными линиями рядом с экспериментальными данными, показанными сплошными линиями.

РИСУНОК 11

**Средние субъективные оценки переходов яркости при разном времени адаптации
по сравнению с приближительными средними субъективными оценками**



Ниже приведены оптимальные значения τ для этой функциональной формы (в пределах доверительных интервалов). Чтобы сократить время адаптации, в разделе 2 используется нижний предел оптимальных значений:

$$\tau = \begin{cases} [22-25] \frac{f}{24} & \text{при } p(t) \geq 0; \\ [800-2000] \frac{f}{24} & \text{при } p(t) < 0. \end{cases}$$

Спад со временем точнее соответствует тенденциям экспериментальных данных для версии яркое-темное-яркое. Заметное отклонение демонстрирует кривая 100 кд/м² в районе 10 секунд. Будет полезна дальнейшая работа по изучению этого выброса. При переходе темное-яркое-темное постоянная времени спада не соответствует экспериментальным данным столь же точно, как при переходе яркое-темное-яркое. Это происходит главным образом из-за повышенного влияния величины кратковременных перепадов яркости. Наблюдатели заметили немедленное остаточное изображение даже после самого кратковременного яркого изображения. Текущая функциональная форма не допускает резкого скачка вниз с последующим медленным спадом. Будет полезна дальнейшая работа по исследованию этого явления.