

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ

Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«МОСКОВСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
СВЯЗИ И ИНФОРМАТИКИ»
(МТУСИ)

Кафедра Телевидения и Звукового Вещания имени С.И. Катаева

Лабораторная практикум

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Лабораторная работа № 70а. Изучение временных характеристик ЗСЧ

Лабораторная работа № 70б. Изучение пространственных характеристик ЗСЧ

Москва 2017

План УМД на 2016/2017 уч. г.

Для студентов направлений подготовки 11.03.01 «Радиотехника» по дисциплине «Методы цифровой обработки сигналов в телевидении» и 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» по дисциплине «Психологические аспекты восприятия зрительных образов»

Лабораторный практикум

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Лабораторная работа № 70а. Изучение временных характеристик ЗСЧ

Лабораторная работа № 70б. Изучение пространственных характеристик ЗСЧ

Авторы: Власюк И.В., к.т.н.

Поташников А.М.

Романов С.Г.

Издание утверждено советом факультета РиТ, протокол № 9 от 18 мая 2017.

Рецензент: Балобанов А.В., к.т.н.

Цель работы

Изучить зависимости воспринимаемой контрастности от пространственной и временной частоты, воздействия длины волны (цвета) и ее анизотропии.

Сделать выводы о возможности эффективного кодирования видеоинформации с учетом измеренных характеристик.

Теоретическая часть

При взгляде на окружающий мир, первичное событие состоит в фокусировке света на сетчатке каждого глаза. Сетчатка содержит 125 миллионов рецепторов, называемых палочками и колбочками; это нервные клетки, специализированные таким образом, чтобы генерировать электрические сигналы при попадании на них света. Задача остальной части сетчатки и самого мозга — использовать эти сигналы, чтобы извлечь биологически полезную информацию. Результатом будет зрительная сцена в том виде, как мы ее воспринимаем, со всей сложностью форм, глубины, движения, цвета и текстуры.

Раздражителем для органов зрения человека является свет. За восприятие света в глазу человека отвечают фоторецепторы – палочки (черно-белое изображение при низкой освещенности) и колбочки (цветное изображение при достаточной освещенности).

1. Глазное яблоко

Совокупная функция несетчаточных частей глаз заключается в том, чтобы обеспечить на двух сетчатках сфокусированное четкое изображение внешнего мира. Для обоих глаз задача слежения за объектом должна выполняться с точностью до нескольких угловых минут - иначе видимое изображение будет двоиться. (Чтобы понять, насколько такое двоение может быть мучительным, попробуйте посмотреть на что-нибудь, надавив на край одного из глаз указательным пальцем.)

Столь точные движения требуют для своей реализации набора тонко настроенных рефлексов, включая те, которые контролируют положение головы.

Роговица (прозрачная передняя часть глаза) и хрусталик вместе образуют эквивалент линзы фотоаппарата. Приблизительно две трети общего преломления света, необходимого для фокусировки, происходит на границе воздух — роговица, где свет входит в глаз. Оставшуюся треть фокусирующей

способности реализует хрусталик, но его главная задача — обеспечить необходимое регулирование для фокусировки на объектах, расположенных на разных расстояниях от глаза. При фокусировке фотоаппарата, изменяется расстояние от линзы до фотопленки; в глазу же изменяется не расстояние от хрусталика до сетчатки, а форма эластичного студенистого хрусталика — путем натяжения или ослабления прикрепленных к его краю сухожилий таким образом, что для близких объектов он делается более выпуклым, а для удаленных — более плоским.

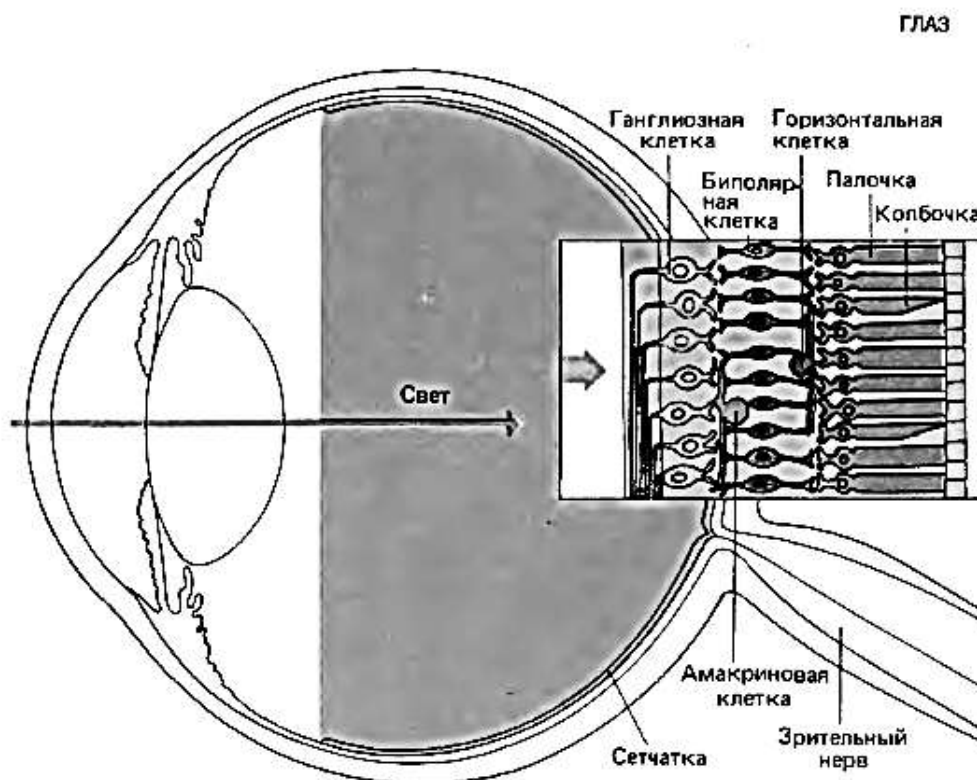


Рисунок 1. Строение глаза человека

Примерно в 45 лет хрусталик становится более жестким и глаз постепенно утрачивает способность фокусировать. Чтобы обойти это существенное возрастное неудобство, Бенджамин Франклин изобрел бифокальные очки. Рефлекс, приводящий к сокращению цилиарных мышц и делающий хрусталик более выпуклым, определяется зрительным входом и тесно связан с рефлексом, контролирующим сопутствующий поворот глаз. Две другие совокупности мышечных волокон изменяют диаметр зрачка и таким образом регулируют количество света, поступающего в глаз, точно так же, как в фотографическом аппарате это делает диафрагма. Система радиальных волокон, напоминающих спицы колеса, расширяет зрачок; другие, кольцевые волокна сужают его.

Наконец, очистка передней поверхности роговицы достигается морганием век и смазкой из слезных желез. Роговица обильно снабжена нервами, чувствительными к прикосновению и боли, — вот почему малейшее раздражение пылинками вызывает рефлекс, который ведет к морганию и усиленному выделению слез.

2. Сетчатка

Сетчатка - это часть мозга, отделившаяся от него на ранних стадиях развития, но все еще связанная с ним посредством пучка волокон - зрительного нерва. Подобно многим другим структурам центральной нервной системы, сетчатка имеет форму пластинки, в данном случае толщиной приблизительно в четверть миллиметра. Она состоит из трех слоев тел нервных клеток, разделенных двумя слоями синапсов, образованных аксонами и дендритами этих клеток.

Слой клеток на задней поверхности сетчатки содержит светочувствительные рецепторы - палочки и колбочки. Палочки, значительно более многочисленные, чем колбочки, ответственны за наше зрение при слабом свете и отключаются при ярком освещении. Колбочки не реагируют на слабый свет, но ответственны за способность видеть тонкие детали и за цветное зрение.

Число палочек и колбочек заметно изменяется в разных частях сетчатки. В самом центре, где способность нашего зрения различать тонкие детали максимальна, имеются только колбочки. Эту лишенную палочек зону диаметром примерно пол миллиметра называют **центральной ямкой**. Колбочки имеются по всей сетчатке, но наиболее плотно упакованы в центральной ямке.

Поскольку палочки и колбочки расположены на задней поверхности сетчатки, поступающий свет должен пройти через два других слоя, чтобы их стимулировать. Точно не установлено, почему сетчатка устроена таким странным образом - как бы перевернута. Одна из возможных причин - то, что позади рецепторов находится слой клеток, содержащих черный пигмент меланин (он имеется также в коже). Меланин поглощает прошедший через сетчатку свет, не давая ему отражаться назад и рассеиваться внутри глаза; он играет ту же роль, что и черная окраска внутренности фотокамеры. Клетки, содержащие меланин, способствуют также химическому восстановлению светочувствительного зрительного пигмента, который обесцвечивается на свету. Для выполнения обеих функций нужно, чтобы меланин находился поблизости от рецепторов.

Слои перед рецепторами довольно прозрачны и, вероятно, не сильно вредят четкости изображения. Однако, на центральном миллиметре, где зрение наиболее остро, последствия даже небольшого уменьшения четкости были бы

катастрофическими, и эволюция сместила другие слои к периферии, образовав здесь кольцо из утолщенной сетчатки и обнажив центральные колбочки так, что они оказались на самой поверхности. Образующееся маленькое углубление и есть центральная ямка.

Средний слой сетчатки расположен между палочками и колбочками, с одной стороны, и ганглиозными клетками - с другой.

В каждом глазу около 125 миллионов палочек и колбочек, но всего 1 миллион ганглиозных клеток.

3. Пространственные характеристики зрительной системы человека (ЗСЧ)

Исследования зрительного анализатора человека установили существенные различия пороговой чувствительности и разрешающей способности для различных направлений. Их иллюстрирует график границ пространственно-частотной характеристики зрения на Рис. 2. Пространственные частоты на этом графике оцениваются количеством линий, различаемых на единице угла зрения, охватывающего штриховую мишу, предъявляемую испытуемому. Такая размерность пространственной частоты позволяет в определенной мере отвлечься от расстояния, на котором рассматривается тест.

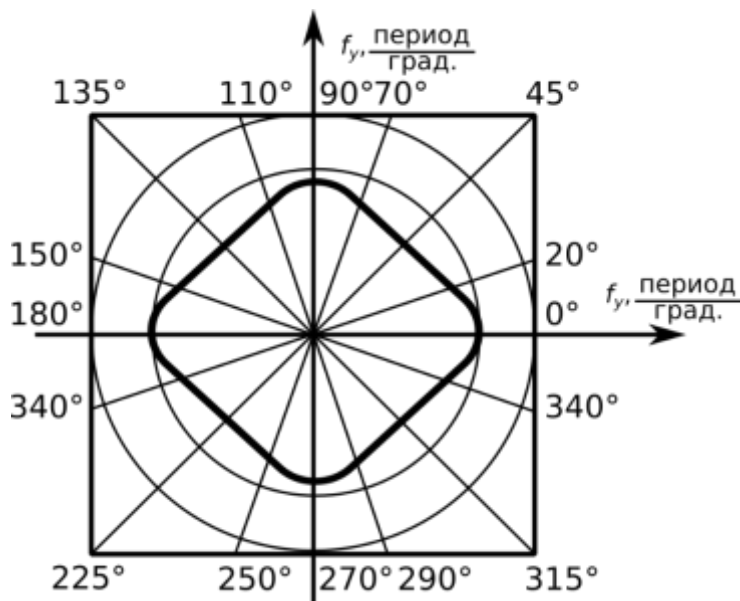


Рисунок 2. Границы пространственно-частотной характеристики зрения.

Способность глаза различать вертикальные, горизонтальные и наклонные штрихи находится в соотношении 1,0:0,8:0,46.

На уровне восприятия, превышающем уровень сетчатки, мозг как бы перераспределяет свои ресурсы в пользу визуально более важных, чем наклонные, вертикальных и горизонтальных направлений.

Отмеченные выше особенности позволяют сделать следующие выводы:

- для отдельно взятых контуров, линий и систем штрихов различной ориентации разрешающая способность зрения лежит в пределах, устанавливаемых графиком на рисунке 2;
- при рассматривании аналогичных элементов в соседстве с элементами другой ориентации зрение концентрируется на вертикальных и горизонтальных деталях даже в тех случаях, когда его острота достаточна, чтобы различить детали любого наклона.

Таким образом, рассмотренная выше специфика зрительного восприятия естественным образом согласуется со свойствами изображений и сформировалась на фоне анизотропии в распределении контуров по направлениям в зрительно воспринимаемом окружающем мире.

Подобная гармония не распространяется лишь на узкий класс изображений, к которому можно отнести аэрофотоснимки или изображения земной поверхности и ее облачного покрова, полученные из космоса. Для этих изображений сами понятия «верх», «низ», «справа» и «слева» условны. В то же время, вряд ли можно считать изотропными в указанном смысле такие искусственно созданные изображения, как знаки типографского шрифта, произведения абстрактной живописи и т. п. Художники выбирают силу линий и контуров различной ориентации, интуитивно учитывая данную особенность зрения.

4. Цветовые характеристики ЗСЧ

Для характеристики восприятия света важны три качества:

1. Тон,
 2. Насыщенность,
 3. Яркость.
- **Тон** соответствует цвету и меняется с изменением длины волны света.
 - **Насыщенность** означает количество монохроматического света, добавление которого к белому свету обеспечивает получение ощущения, соответствующего длине волны добавленного монохроматического света, содержащего только одну частоту (или длину волны).
 - **Яркость** света связана с его интенсивностью.

Диапазон интенсивностей света от порога восприятия до величин, вызывающих

болевые ощущения, огромен — 160 дБ. Воспринимаемая человеком яркость объекта зависит не только от интенсивности, но и от окружающего его фона. Если фигура (*зрительный стимул*) и фон освещены одинаково, то есть между ними нет контраста, яркость фигур возрастает с увеличением физической интенсивности освещения. Если контраст между фигурой и фоном увеличивается, яркость воспринимаемой фигуры уменьшается с увеличением освещенности.

Восприятие цвета зависит от длины волны света, попадающего в глаз. Однако, такое утверждение справедливо лишь для монохроматических лучей, то есть лучей с одной длиной волны. Белый свет содержит все длины световых волн.

Существует три основных цвета:

- красный — 625—740 нм;
- зеленый — 500—565 нм;
- синий — 440—485 нм.

В результате смешивания основных цветов можно получить любой цвет. Объясняют цветовое зрение на основе предположения о существовании в сетчатке глаза **фоторецепторов** трех различных типов, чувствительных к различным длинам волн света, соответствующих основным частотам спектра (синий, зеленый, красный).

Нарушение восприятия цвета называется цветовой слепотой, или дальтонизмом, по имени Дальтона, который впервые описал этот дефект зрения на основе собственного опыта. Дальтонизмом страдают, в основном, мужчины (около 10%) в связи с отсутствием определенного гена в X-хромосоме.

Известны следующие типы нарушений светового зрения:

- *протанопия* — отсутствие чувствительности к красному цвету,
- *дейтеранопия* — отсутствие чувствительности к зеленому цвету,
- *тританопия* — отсутствие чувствительности к синему цвету.
- *монохроматия* — полная цветовая слепота (встречается исключительно редко).

5. Временные характеристики ЗСЧ

Временные характеристики зрения описываются двумя основными показателями

- Временем суммации;
- Критической частотой мельканий.

Временная суммация

Зрительная система обладает определенной инерционностью: после включения стимула необходимо время для появления зрительной реакции (оно включает время, требующееся для развития химических процессов в рецепторах). Исчезает зрительное впечатление не сразу, а лишь через некоторое время после прекращения действия на глаз света или изображения, поскольку для восстановления зрительного пигмента сетчатке глаза также требуется время. Существует эквивалентность между интенсивностью и длительностью действия света на глаз. Чем короче зрительный стимул, тем большую интенсивность он должен иметь, чтобы вызывать зрительное ощущение. Таким образом, для возникновения зрительного ощущения имеет значение суммарное количество световой энергии. Эта связь между длительностью и интенсивностью сохраняется лишь при коротких длительностях стимулов — до 20 мс. Для более длительных сигналов (от 20 мс до 250 мс) полная компенсация пороговой интенсивности (яркости) за счет длительности уже не наблюдается. Всякая зависимость между способностью к обнаружению света и его длительностью исчезает после того, как продолжительность стимула достигает 250 мс, а при больших длительностях решающей становится интенсивность. Зависимость пороговой интенсивности света от длительности его воздействия называется временной суммацией. Этот показатель используется для оценки функции зрительной системы.

Критическая частота мельканий

Зрительная система сохраняет следы светового раздражения в течение 150-250 мс после его включения. Это свидетельствует о том, что глаз воспринимает прерывистый свет, как непрерывный, при определенных интервалах между вспышками. Частота вспышек, при которой ряд последовательных вспышек воспринимается как непрерывный свет, называется критической частотой мельканий. Этот показатель неразрывно связан с временной суммацией: процесс суммации обеспечивает плавное слияние последовательных изображений в непрерывный поток зрительных впечатлений. Чем выше интенсивность световых вспышек, тем выше критическая частота мельканий. Критическая частота мельканий при средней интенсивности света составляет 16-20 в 1 с.

6. Нелинейность восприятия яркости или освещенности

Восприятие практически любой системы органов чувств человека носит нелинейный характер. Если сигнал на входе становится во сколько-то раз

сильнее, это не значит, что человек воспринимает его в то же число раз как более сильный.

Сила ощущения p пропорциональна логарифму интенсивности раздражителя S :

$$p = k \ln(S/S_0) \quad (1)$$

где S – значение интенсивности раздражителя. S_0 — нижнее граничное значение интенсивности раздражителя: если $S < S_0$, раздражитель совсем не ощущается, k – константа, зависящая от субъекта ощущения.



Рисунок 3. а) энергетически-линейный градиент (20 градаций + максимально-белый фон). б) градиент линейный по ощущению света (энергетически-нелинейный).

Нелинейность восприятия яркостей приводит к тому, что энергетически линейный градиент будет восприниматься осветленным, в первую очередь в тенях, а точка, воспринимаемая как серая, будет резко смещена в область черного (рисунок 3а).

Если говорить об отраженном свете, то поверхность, отражающая 18% света, воспринимается на 50% серой.

Если построить график зависимости яркости, субъективно воспринимаемой мозгом, от реальной интенсивности света, попадающего в глаз (т.е. количество фотонов), то получится график степенной функции, которая называется гамма функцией (Рисунок 4). Из математических гамм ближе всего к человеческому зрению гамма 2,2.

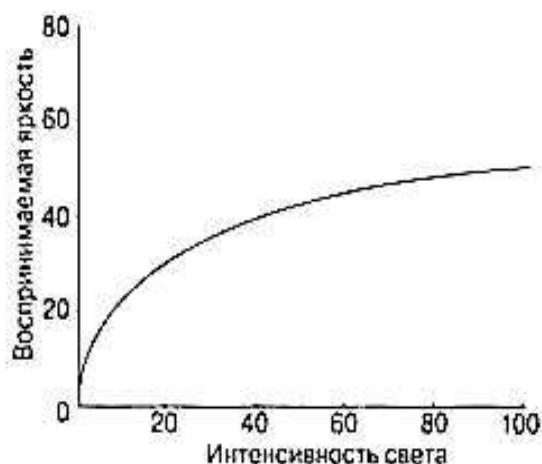


Рисунок 4. Нелинейная зависимость - при увеличении интенсивности света воспринимаемая яркость увеличивается намного меньше.

Интерфейс программы для выполнения лабораторной работы

Программа *Lab_Vision* предназначена для исследования свойств зрительного восприятия и измерения характеристик ЗСЧ.

Для упрощения ознакомления с программой необходимо изучить теоретический материал.

Интерфейс программы позволяет настроить параметры монитора (яркость, значения амплитуды и периода как для временных, так и для пространственных параметров изображения) и выбрать тип изображения (заливка, окружности, обычная или затухающая мира) для того, чтобы каждый пользователь смог проанализировать и измерить характеристики ЗСЧ.

1. Описание активных окон программы

На рисунке 5 изображен общий вид программы.

Значения, вносимые в поля, изменяются по логарифмической сетке (за исключением значений цветов и угла).

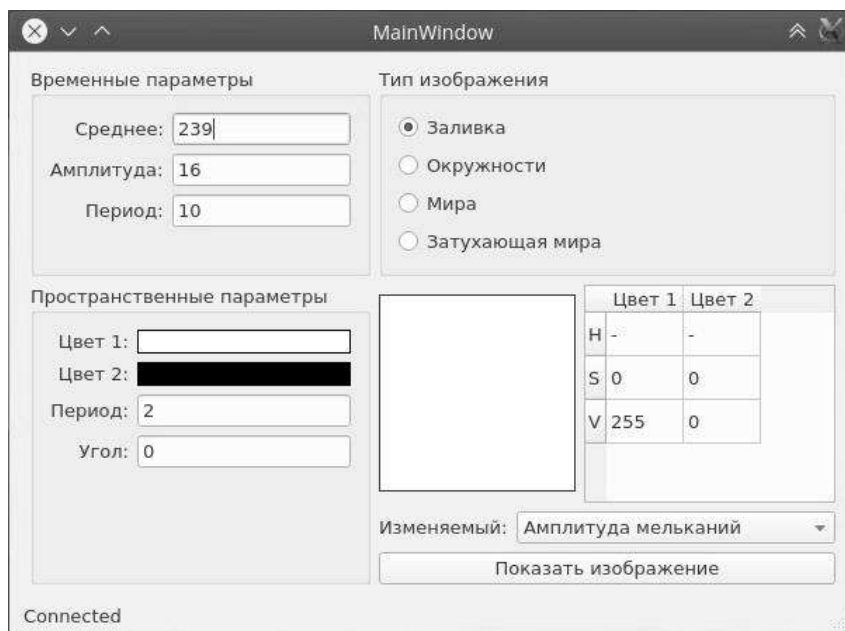


Рисунок 5. Программа Lab_Vision

1.1. Поле *Временные параметры*

В данном поле устанавливаются значения яркости (*Среднее*), амплитуды мельканий, а также периода мельканий.

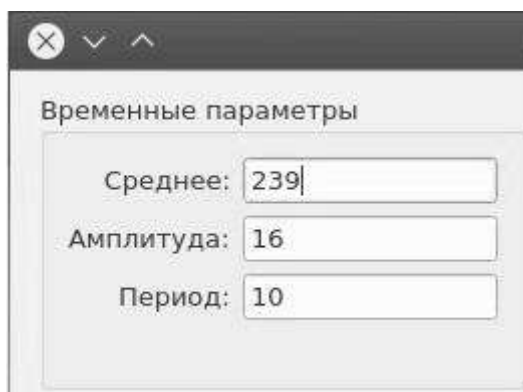


Рисунок 6. Временные параметры.

Временные параметры служат для проведения экспериментов, связанных с восприятием мерцаний монитора.

1.2. Поле *Пространственные параметры*

В данном поле устанавливаются значения цветов, отображаемых на изображении, периода штрихов мира и окружности, а также угла наклона изображения.

При выборе полей *Цвет 1* и *Цвет 2* открывается окно *Select Color* (рисунок 7).

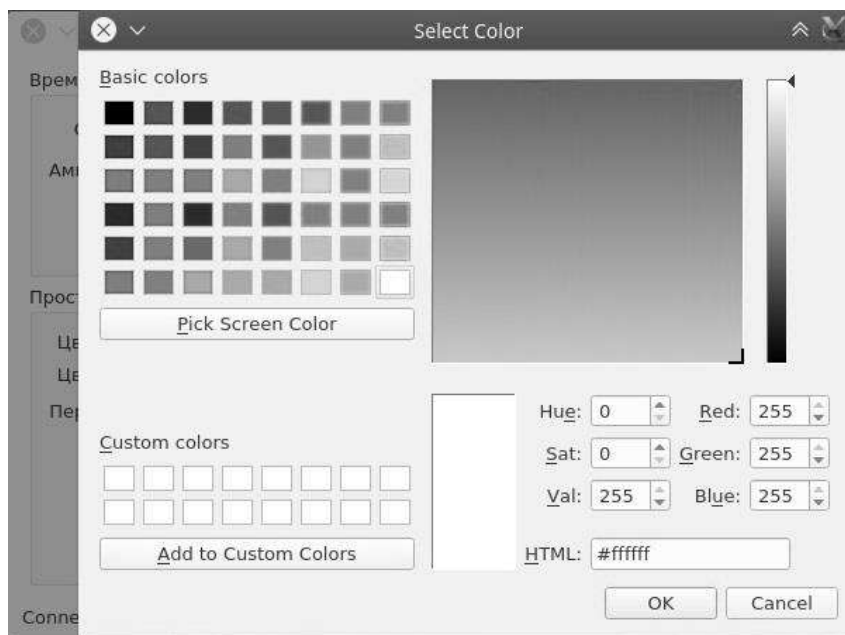


Рисунок 7. Окно выбора цвета.

Данное окно служит для выбора цветов, которые пользователь хочет применить к изображению.

Hue — цветовой тон, (например, красный, зелёный или сине-голубой).

Saturation (Sat) — насыщенность. Чем больше этот параметр, тем «чище» цвет, поэтому этот параметр иногда называют чистотой цвета. А чем ближе этот параметр к нулю, тем ближе цвет к нейтральному серому.

Value (Val) - значение цвета или Brightness — яркость.

Поля *Red*, *Green* и *Blue* также служат для выбора цвета, но по цветовой модели RGB.

Пространственные параметры служат для анализа пороговой чувствительности и разрешающей способности глаза для различных направлений.

1.3. Поле *Тип изображения*

В данном поле выбираются типы изображений:

- Сплошной однотонный фон;
- Окружности заданного цвета;
- Мира;
- Затухающая Мира.

2. Изменяемые параметры

Под окном, в котором отображается рисунок, находится выпадающий список *Изменяемый* (рисунок 8).

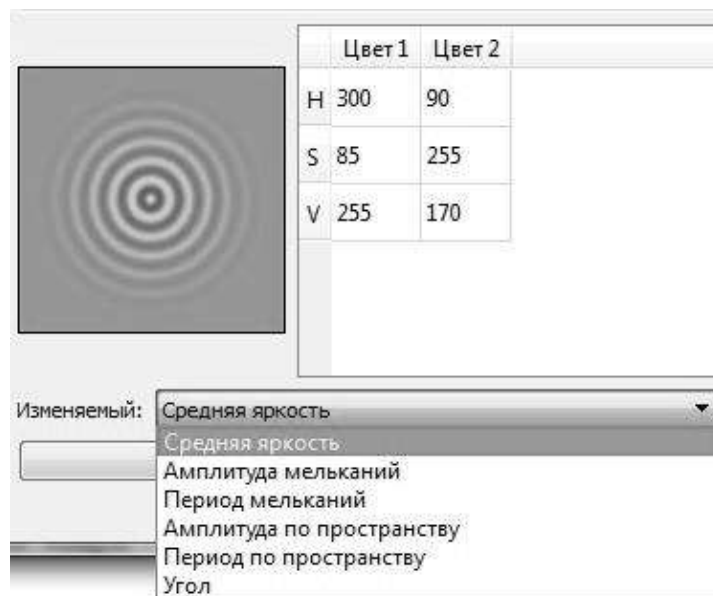


Рисунок 8. Изменяемые параметры.

Данный список обеспечивает изменение значения нужного параметра стрелками клавиатуры (стрелки «вправо» и «влево»).

Выход из полноэкранного режима осуществляется клавишей Esc на клавиатуре.

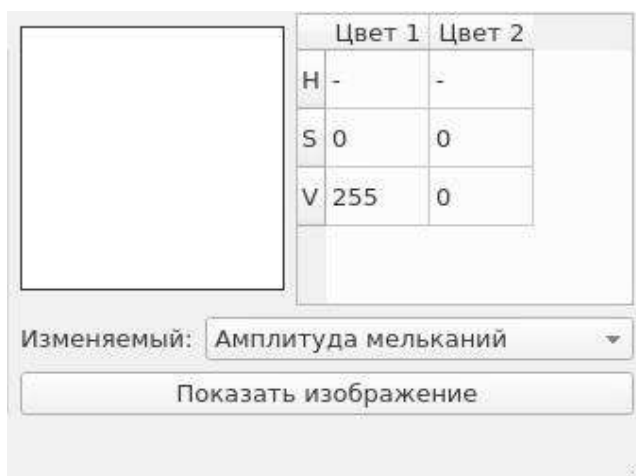


Рисунок 9. Кнопка “Показать изображение” для перехода в полноэкранный режим просмотра изображений.

Домашнее задание

1. Изучить теоретический материал по лабораторной работе.
2. Ознакомиться с интерфейсом программы *Lab_Vision*.

Выполнение лабораторного практикума.

Процесс выполнения работы сводится к анализу и фиксации в отчете информации, появляющейся на экране монитора.

Лабораторная работа рассчитана на двух человек, один из которых проводит эксперимент и фиксирует значения для отчета, а второй является испытуемым.

Лабораторная работа № 70а. Изучение временных характеристик ЗСЧ

Открыть программу **Lab_Vision**.

Пункт 1. Зависимость амплитуды мерцаний от частоты для трех значений яркости

1.1. Определение зависимости при средней яркости 239.

В поле *Временные параметры* установить значения:

Среднее: 239.

Амплитуда: 16.

Период: 25 мс.

В поле *Тип изображения* выбрать: Заливка.

Во вкладке *Изменяемый* выбрать: Амплитуда мельканий.

Открыть изображение в полноэкранном режиме, нажав кнопку *Показать изображение*.

Подобрать минимальную амплитуду, при которой будет заметно мерцание, стрелками вправо (увеличение) или влево (уменьшение).

Зафиксировать в отчете полученные значения периода и амплитуды.

Таким же образом подобрать амплитуду для значений периода, мс: 50, 100, 250, 500, 1000, 2000, 5000, 10000, 15000.

Значения периода и соответствующие им значения амплитуды зафиксировать в отчете.

Таблица 1. Таблица зависимости амплитуды от частоты мельканий

Период	25	50	100	250	500	1000	2000	5000	10000	15000
Частота										
Амплитуда										

По этим значениям построить график зависимости амплитуды от частоты мерцания. При построении использовать логарифмическую шкалу.

1.2. Повторить пункт 1.1 при средней яркости 128 (поле «среднее»).

1.3. Повторить пункт 1.1 при средней яркости 64 (поле «среднее»).

Лабораторная работа № 70б. Изучение пространственных характеристик ЗСЧ

Открыть программу **Lab_Vision**.

Пункт 1. Исследование пороговой пространственной чувствительности глаза для различных направлений

Внимание! Лабораторная работа выполняется при временных параметрах:

Среднее: 128.

Амплитуда: 0.

Период: 0мс.

Эксперимент производится на расстоянии полутора метров от экрана.

1.1. Определение пространственной чувствительности при периоде мира 4 рх

В поле *Пространственные параметры* установить значения:

Цвет1: Val = 156; Sat = 0; Hue = 0.

Цвет2: Val=100; Sat = 0; Hue = 0.

Угол: 0°

Период: 4 рх.

В поле *Тип изображения* выбрать: Затухающая мира.

Во вкладке *Изменяемый* выбрать: Угол.

Открыть изображение в полноэкранном режиме, нажав кнопку *Показать изображение*.

Изменяя угол стрелками вправо или влево, через каждые 30° (при одном нажатии стрелки угол изменяется на 10°) испытуемому требуется выбрать точку, в которой мира сливается с фоном.

Человек, проводящий эксперимент, должен фиксировать ширину видимой части мира (нормированную к диаметру тестового изображения). Для этого требуется нажать мышкой в этой точке. В правом-верхнем углу экрана появится

нормированное расстояние, определяющееся по формуле:

$$l_n = l/d, \quad (2)$$

где l_n – нормированная ширина, l – ширина видимой части миры, d – общий диаметр тестового изображения.

Результаты измерений зафиксировать в отчете.

Минимальная видимая пространственная амплитуда определяется по формуле:

$$A_{\min} = (Val_2 - Val_1) l_n / 2, \quad (3)$$

Где Val_2 и Val_1 – яркости цветов

Таблица 2. Зависимость минимальной видимой пространственной амплитуды от угла поворота миры.

Угол	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
l_n												
A_{\min}												

1.2. Повторить пункт 1.1. с периодом 8.

1.3. Повторить пункт 1.1. с периодом 16.

По этим значениям построить зависимости минимальной видимой пространственной амплитуды от угла поворота миры для пп. 1.1-1.3 на одном графике.

Пункт 2. Зависимость пространственной частоты от амплитуды для ч/б изображения

2.1. Пространственная чувствительность для ч/б изображения

В поле *Пространственные параметры* установить значения:

Цвет1: Val = 128; Sat = 0; Hue = 0.

Цвет2: Val=128; Sat = 0; Hue = 0.

Угол: 90°;

Период: 2 рх.

В поле *Тип изображения* выбрать: Мира.

Во вкладке *Изменяемый* выбрать: Амплитуда по пространству.

Открыть изображение в полноэкранном режиме, нажав кнопку *Показать*

изображение.

Стрелками вправо или влево изменять амплитуду по пространству до тех пор, пока она не станет различима.

Зафиксировать значения яркостей цветов 1 и 2.

Повторить пункт 2.1 с периодами: 4, 8, 16, 32, ..., 256.

Рассчитать амплитуду миры по формуле:

$$A_{min} = \frac{|val_1 - val_2|}{2}; \quad (4)$$

Таблица 3. Зависимость минимальной видимой насыщенности от частоты.

Период	2	4	8	16	32	64	128	256
Частота								
A_{min}								

Построить зависимости амплитуды миры от пространственной частоты (при построении использовать логарифмическую шкалу).

Пункт 3. Пространственная чувствительность для цветного изображения

В поле *Пространственные параметры* установить значения:

Угол: 90^0 ;

Период: 2 пх.

В поле *Тип изображения* выбрать: Затухающая Мира.

В поле *Пространственные параметры* установить значения из таблицы 4 (цвет в формате [Red, Green, Blue]) в зависимости от номера подгруппы.

Таблица 4. Значение компонент цветов для эксперимента

Номер подгруппы	Цвет 1	Цвет 2
1, 4, 7, 10, 13, 16, 19	[63, 63, 128]	[128, 128, 63]
2, 5, 8, 11, 14, 17, 20	[128, 63, 63]	[63, 128, 128]
3, 6, 9, 12, 15, 18, 21	[63, 128, 63]	[128, 63, 128]

Открыть изображение в полноэкранном режиме, нажав кнопку *Показать изображение.*

Испытуемому требуется выбирать точку, в которой мира сливается с фоном.

Человек, проводящий эксперимент, должен фиксировать ширину видимой части мира (нормированную к диаметру тестового изображения). Для этого требуется нажать мышкой в этой точке. В правом-верхнем углу экрана появится нормированное расстояние, определяющееся по формуле 2.

Результаты измерений зафиксировать в отчете.

Минимальная видимая насыщенность определяется по формуле:

$$S_{\min} = Sat \cdot l_{\text{н}}, \quad (5)$$

Где Sat – насыщенность цвета.

Повторить измерение с периодами: 4, 8, 16, 32, ..., 256.

Таблица 5. Зависимость минимальной видимой насыщенности от частоты.

Период	2	4	8	16	32	64	128	256
Частота								
S_{\min}								

По этим значениям построить график зависимости минимальной видимой насыщенности от пространственной частоты.

Контрольные вопросы

1. Что является раздражителем для органов зрения человека?
2. Что такое палочки и колбочки? Какие функции они выполняют?
3. Что такое тон, насыщенность и яркость?
4. Временные характеристики ЗСЧ.

Список литературы

1. Хьюбел Дэвид. Глаз, мозг, зрение, Биология, Москва, издательство «Мир», 1990 год.
2. Ричард Филлипс Фейнман. Фейнмановские Лекции по Физике, том № 3, гл. 35 (Цветовое зрение).