

МАЛОГАБАРИТНЫЙ ПРИБОР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОРОГОВ ЦВЕТОРАЗЛИЧЕНИЯ И КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ АНОМАЛИЙ ЦВЕТОВОГО ЗРЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА

© 2014 г. В. А. Соловьев, доктор техн. наук; М. В. Колокольцев, аспирант

Пензенский государственный университет, Пенза

E-mail: mkolokoltsev@yandex.ru

Предложен малогабаритный прибор для исследования порогов цветоразличения и контроля качества цветового зрения человека, в котором синтез излучений осуществляется цифровой системой управления, причем синтез цвета тестового поля можно проводить в любом, предварительно заданном направлении цветового пространства.

Точная диагностика цветового зрения человека необходима как при профессиональном отборе, так и при выявлении приобретенных нарушений, которые являются симптомами таких заболеваний как рассеянный склероз, диабет, сифилис, лейкемия, расстройства зрительного нерва.

Ключевые слова: цветовое зрение, эффективная яркость, порог цветоразличения, цветовое пространство, направление синтеза цвета.

Коды OCIS: 330.1720

Поступила в редакцию 10.01.2014

Наибольшую популярность в диагностике цветового зрения получили цветовые таблицы и тесты в силу их простоты и дешевизны. Они позволяют выявлять грубые нарушения цветового зрения врожденного характера. Для более детальной и точной диагностики применяется инструментальный метод, в основе которого лежит использование специальных приборов – аномалоскопов. Принцип их действия подробно описан в работе [1].

Сегодня контроль качества цветового зрения в основном проводится табличным методом. Отсутствие специальных приборов в офтальмологических клиниках или их несоответствие современным требованиям приводит к тому, что инструментальный метод практически не используется даже в тех случаях, когда необходима точная диагностика цветового зрения.

В данной работе рассматривается малогабаритный прибор (190×180×280 мм) для количественной оценки качества цветового зрения человека и исследования порогов цветоразличения в заданных точках цветового пространства на основе импульсной системы синтеза цветов (рис. 1).

В предлагаемом приборе в качестве основных используются излучения работающих в импульсном режиме светодиодов, излучающих в красной,

зеленой и синей областях спектра. Воздействие импульсного излучения на сетчатку глаза наблюдателя с частотой, большей критической, приводит к тому, что наблюдатель перестает видеть изменение яркости, а видит стабильную эффективную яркость B_{ef} , которая в соответ-



Рис. 1. Внешний вид прибора.

ствии с законом Тальбота [2] определяется средней яркостью за период T

$$B_{\text{ef}} = \frac{1}{T} \int_0^T B(t) dt. \quad (1)$$

В работе [2] показано, что суммарная эффективная яркость при изменении скважности трех источников – красного, синего, зеленого излучений, соответствует

$$B_{\text{ef}} = (t_{ur}/T)B_r + (t_{ub}/T)B_b + (t_{ug}/T)B_g. \quad (2)$$

Координаты цвета связаны с координатами цветности x_i, y_i соотношениями [3]

$$X_i = N_i C_{xi} x_i, \quad Y_i = N_i C_{yi} y_i, \quad Z_i = N_i C_{zi} z_i, \quad (3)$$

где $N_i = t_{im,i}/T$ – коэффициент заполнения импульсов излучения i -го источника, обратный скважности импульсов, C_{xi}, C_{yi}, C_{zi} – коэффициенты пропорциональности, связывающие координаты цветности с соответствующими координатами цвета.

Если при синтезе цвета используются h импульсных источников (основных цветов), на основании закона Грассмана можно записать

$$\begin{aligned} X_c &= \sum_{i=1}^h N_i C_{xi} x_i, \quad Y_c = \sum_{i=1}^h N_i C_{yi} y_i, \\ Z_c &= \sum_{i=1}^h N_i C_{zi} z_i. \end{aligned} \quad (4)$$

Направление синтеза на графике цветности задается прямой линией, проходящей через точку синтезируемого цвета с координатами цветности x_c, y_c и углом α между прямой и осью x . На рис. 2 приведен график цветности, поясняющий последующие выводы.

Уравнение прямой, проходящей через точку с координатами x_c, y_c и углом α , будет иметь вид

$$y - y_c = \operatorname{tg} \alpha (x - x_c). \quad (5)$$

Уравнение прямой, проходящей через две точки с координатами x_2, y_2 и x_3, y_3 , записывается как

$$\frac{y - y_2}{y_3 - y_2} = \frac{x - x_2}{x_3 - x_2}. \quad (6)$$

Совместным решением уравнений (5) и (6) получим координаты цветности точки x_{p2}, y_{p2}

$$\begin{aligned} x_{p2} &= \frac{\operatorname{tg} \alpha x_c y_3 - y_c x_3 - \operatorname{tg} \alpha x_c x_2 -}{y_3 - y_2 +} \\ &\quad - \frac{y_c x_2 + y_2 x_3 - y_3 x_2}{\operatorname{tg} \alpha x_3 + \operatorname{tg} \alpha x_2}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} y_{p2} &= \frac{\operatorname{tg} \alpha x_c y_3 - y_c y_3 - \operatorname{tg} \alpha x_c x_2 -}{y_3 - y_2 +} \\ &\quad - \frac{y_c y_2 + \operatorname{tg} \alpha y_2 x_3 - \operatorname{tg} \alpha y_3 x_2}{\operatorname{tg} \alpha x_3 + \operatorname{tg} \alpha x_2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Аналогично определяется точка пересечения с координатами x_{p1}, y_{p1}

$$\begin{aligned} x_{p1} &= \frac{\operatorname{tg} \alpha x_c x_2 - y_c x_2 - \operatorname{tg} \alpha x_c x_1 -}{y_2 - y_1 +} \\ &\quad - \frac{y_c x_1 + y_1 x_2 - y_2 x_1}{\operatorname{tg} \alpha x_2 + \operatorname{tg} \alpha x_1}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} y_{p1} &= \frac{\operatorname{tg} \alpha x_c y_2 - y_c y_2 - \operatorname{tg} \alpha x_c x_1 -}{y_2 - y_1 +} \\ &\quad - \frac{y_c y_1 + \operatorname{tg} \alpha y_1 x_2 - \operatorname{tg} \alpha y_2 x_1}{\operatorname{tg} \alpha x_2 + \operatorname{tg} \alpha x_1}. \end{aligned} \quad (10)$$

Координаты x_{p1}, y_{p1} определяют соотношение между скважностями излучений N_1 и N_2 основных цветов с координатами цветности x_1, y_1 и x_2, y_2 , а координаты x_{p2}, y_{p2} определяют соотношение между N_2 и N_3 излучениями основных цветов с координатами x_2, y_2 и x_3, y_3 .

Для определения отношений $m = N_2/N_1$ и $n = N_3/N_2$, которые определяют направление синтеза, запишем, используя формулу (4)

$$X_{p1} = N_1 C_{x_1} x_1 + N_2 C_{x_2} x_2,$$

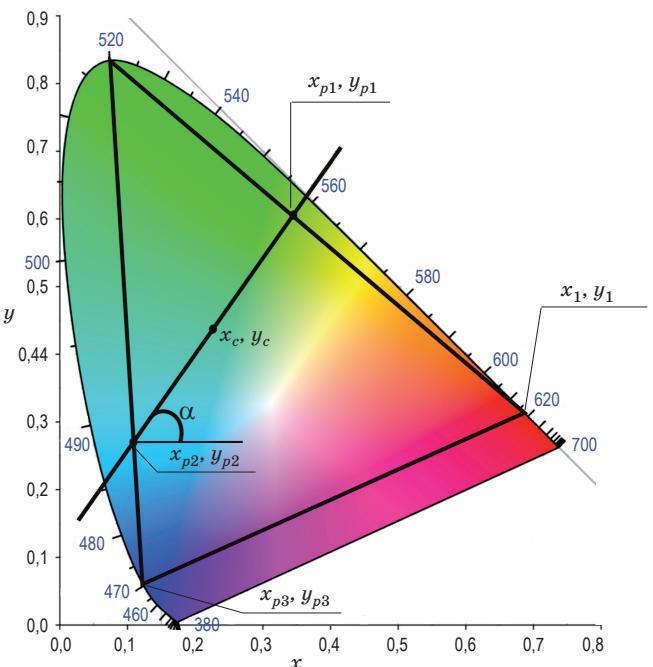


Рис. 2. Графическое пояснение к синтезу цвета в заданном направлении цветового пространства.

$$Y_{p1} = N_1 C_{y_1} y_1 + N_2 C_{y_2} y_2, \quad (11)$$

$$Z_{p1} = N_1 C_{z_1} z_1 + N_2 C_{z_2} z_2.$$

Координаты цветности x_{p1}, y_{p1} найдем из соотношений

$$x_{p1} = \frac{X_{p1}}{X_{p1} + Y_{p1} + Z_{p1}}, \quad y_{p1} = \frac{Y_{p1}}{X_{p1} + Y_{p1} + Z_{p1}}. \quad (12)$$

Подставляя формулы (11) в (12) получим

$$\begin{aligned} x_{p1} &= \frac{N_1 C_{x_1} x_1 +}{N_1 (C_{x_1} x_1 + C_{y_1} y_1 + C_{z_1} z_1) +} \\ &\quad + N_2 C_{x_2} x_2 \\ &+ N_2 (C_{x_2} x_2 + C_{y_2} y_2 + C_{z_2} z_2) \quad (13) \\ &= \frac{C_{x_1} x_1 +}{C_{x_1} x_1 + C_{y_1} y_1 + C_{z_1} z_1 +} \\ &\quad + m C_{x_2} x_2 \\ &+ m C_{x_2} x_2 + m C_{y_2} y_2 + m C_{z_2} z_2 \end{aligned}$$

а из этого соотношения – значение m

$$m = \frac{x_{p1} C_{x_1} x_1 + x_{p1} C_{y_1} y_1 + x_{p1} C_{z_1} z_1 - C_{x_1} x_1}{C_{x_2} x_2 - x_{p1} C_{x_2} x_2 - x_{p1} C_{y_2} y_2 - x_{p1} C_{z_2} z_2}. \quad (14)$$

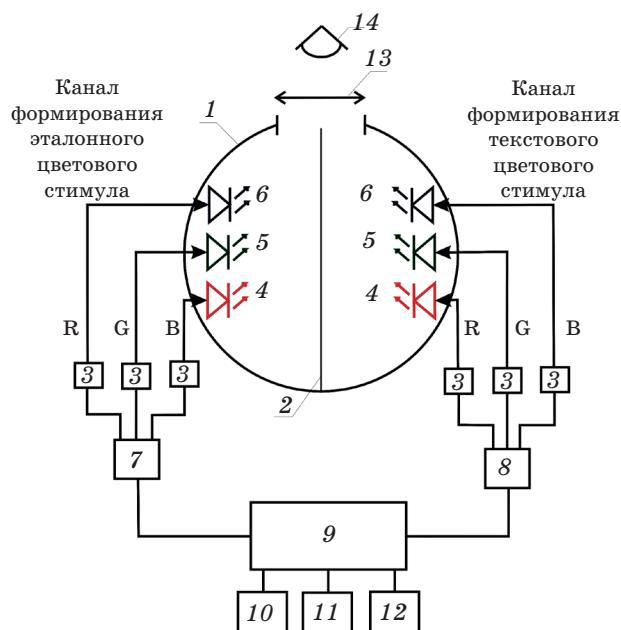


Рис. 3. Функциональная схема прибора для исследования порогов цветоразличения и количественной оценки аномалий цветового зрения человека. Интегрирующая сфера – 1, непрозрачная перегородка – 2, транзисторные управляемые ключи – 3, спектрональные светодиоды – 4, 5, 6, контроллер эталонного цвета – 7, контроллер тестового цвета – 8, микроконтроллер – 9, регулятор – 10, регуляторы для установления направления синтеза цвета – 11, 12, окуляр – 13, наблюдатель – 14.

Аналогично можно рассчитать значение n

$$n = \frac{x_{p2} C_{x_2} x_2 + x_{p2} C_{y_2} y_2 + x_{p2} C_{z_2} z_2 - C_{x_2} x_2}{C_{x_3} x_3 - x_{p2} C_{x_3} x_3 - x_{p2} C_{y_3} y_3 - x_{p2} C_{z_3} z_3}. \quad (15)$$

Таким образом, задаваясь координатами цветности x_c, y_c синтезируемого цвета в тестовом поле и направлением синтеза определяемого углом α , находятся соотношения скважностей m и n источников излучения, которые должны поддерживаться системой управления неизменными в процессе синтеза цветов и установления цветового равенства.

Функциональная схема прибора для исследования порогов цветоразличения и количественной оценки аномалий цветового зрения человека на основе импульсной системы синтеза цветов приведена на рис. 3.

Интегрирующая сфера разделена непрозрачной перегородкой на две полости, которые покрыты составом, имеющим высокий коэффициент диффузного отражения. В левой и правой частях интегрирующей сферы смешиваются излучения спектрональных светодиодов, образующие цвета эталонного и тестового полей, которые видит наблюдатель через окуляр. Светодиоды через транзисторные управляемые ключи соединены с выходами PWMR, PWMG, PWMB контроллеров эталонного и тестового цветов, имеющих в своем составе по три 12-разрядных ШИМ модулятора.

Координаты цветности в канале формирования эталонного цветового стимула устанавливаются вручную регулятором 10 подбора цвета полей, соединенным с микроконтроллером, который вычисляет необходимые значения скважностей включения светодиодов в соответствии с формулами (4), и управляет контроллером эталонного цвета. В канале формирования тестового цветового стимула устанавливается направление синтеза цвета, определяемое координатами цветности x_c, y_c и углом α (регуляторы 11, 12). На основе заданных координат x_c, y_c и угла α в соответствии с формулами (7–10, 14, 15) микроконтроллером вычисляются соотношения скважностей m и n источников, которые служат основой для управления контроллером тестового цвета. Регулятором 10 осуществляется уравнивание цветов тестового и эталонного полей при неизменном соотношении скважностей m и n источников излучения, которое необходимо для сохранения выбранного направления синтеза цвета.

Обмен данными с контроллерами цвета микроконтроллером осуществляется посредством последовательного интерфейса I2C.

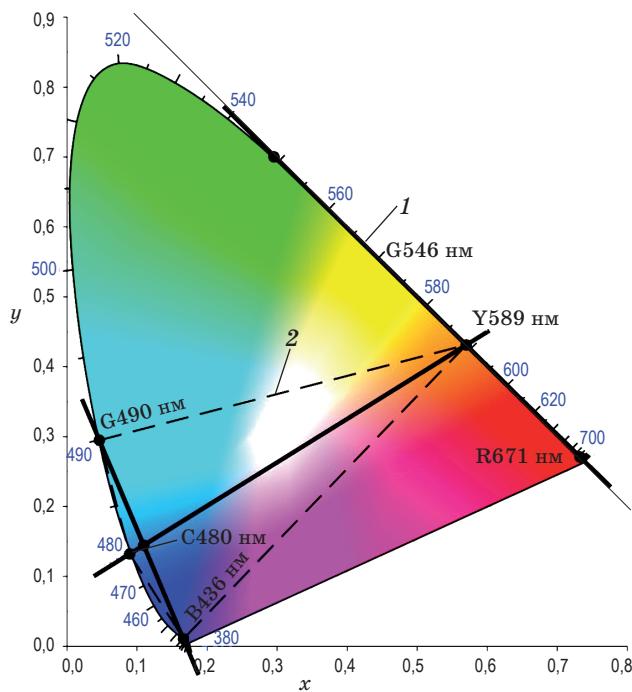


Рис. 4. Графическое пояснение уравнивания цветов в аномалоскопах Раутиана и Хайдельберга. 1 – линия равенства Рэлея, относительно которой проводится уравнивание цветов в аномалоскопе Раутиана, 2 – область цветового пространства, охватываемая равенством Морелонда, в которой действует аномалоскоп Хайдельберга.

Предусматриваются два режима работы прибора: исследование порогов цветоразличения в заданной точке цветового пространства и количественная оценка аномалий цветового зрения человека.

При исследовании порогов цветоразличения регулятором 10 задается точка цветового пространства, в которой необходимо оценить пороги цветоразличения. В эталонном поле синтезируется заданный цвет. В тестовом поле задается направление синтеза цвета и осуществляется уравнивание цветов эталонного и тестового полей регулятором 11 при подходе слева и справа по линии к точке. Затем направление синтеза меняется и повторяется процедура уравнивания цветов эталонного и тестового полей. По результатам этой процедуры в различных направлениях строится эллипс или эллипсоид порогов цветоразличения.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Шамшинова А.М., Волков В.В. Функциональные методы исследования в офтальмологии. М.: Медицина, 1999. 416 с.
2. Луизов А.В. Глаз и свет. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 140 с.
3. Соловьев В.А. Визуальный колориметр // А.с. № 1554554. Бюл. изобр. 1987. № 27.
4. Юстова Е.Н. Цветовые измерения (Колориметрия). СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2000. 397 с.
5. OCULUS. Instruction Manual HMC Anomaloskop.

При количественной оценке аномалий цветового зрения человека используется коэффициент аномальности, который определяет соотношения зеленого и красного основных цветов в тестовом поле при установлении цветового равенства с эталонным полем прибора.

В аномалоскопе Раутиана [4] уравнивание цветов осуществляется вдоль линии, соединяющей красный и зеленый основные цвета на графике цветности (1), т.е. только в красно-зеленой области, рис. 4.

Излучение с длиной волны 589 нм направляется на эталонное поле, а излучения с длинами волн 671 и 546 нм смешиваются на тестовом поле. Испытуемый, изменяя соотношения интенсивностей световых потоков, перемещает координату цветности тестового поля вдоль линии, соединяющей координаты цветности монохроматических излучений с длинами волн 671 и 546 нм, до установления визуального равенства Рэлея эталонного и тестового полей.

В аномалоскопе Хайдельберга модели HMC-R [5] тестирование цветового зрения осуществляется в красно-зеленой области цветового пространства в соответствии с равенством Рэлея.

Вторая модель аномалоскопа Хайдельберга HMC-MR для проверки аномалий зрения кроме равенства Рэлея использует равенство Морелонда (2). Оно предусматривает установление визуального равенства цветов эталонного и тестового полей в двух направлениях, определяемых двумя линиями. Первой линией, проходящей через точки с координатами цветности источников монохроматических излучений с длинами волн 436 и 490 нм, и второй линии, определяемой координатами цветности источников с длинами волн 480 и 589 нм.

Преимуществом предлагаемого прибора является возможность синтеза на эталонном поле любого цвета, а синтез цвета на тестовом поле осуществлять в любом направлении графика цветности и цветового пространства, что позволяет проводить точную диагностику цветового зрения человека, а также исследовать пороги цветоразличения в заданной точке цветового пространства.