

УДК 681.511.22, 535.66

Арапова С. П., Арапов С. Ю., Суворова Ю. Л.
УрФУ, г. Екатеринбург, Россия

Метод управления индексом цветопередачи для светодиодных модулей RGBW

Аннотация

В статье предложен метод управления яркостями компонентов светодиодных модулей RGBW с использованием широтно-импульсной модуляции. Метод позволяет регулировать значение индекса цветопередачи Ra при фиксированных значениях цветности и общей яркости. Это даёт возможность управлять визуально воспринимаемой насыщенностью зелёных и красных цветов отражающих объектов. Экспериментальная проверка метода показала линейность изменения Ra в зависимости от яркости белого светодиода.

Ключевые слова: светодиодный модуль, метамерность, индекс цветопередачи, насыщенность цвета, кларификация.

Arapova S. P., Arapov S. Yu., Suvorova J. L.
UrFU, Ekaterinburg, Russia

A method for controlling the color rendering index for led RGBW modules

Abstract

This article proposes a method for controlling the components brightness of the RGBW led module using pulse-width modulation. The method allows adjusting the value of color rendering index Ra with fixed values of chromaticity and overall brightness. It's allows to control visually perceived saturation of the green and red colors of reflective objects. Experimental verification of the method showed linearity Ra changes depending on the brightness of the white led.

Key words: led module, metamerism, color rendering index, color saturation, clarification.

© Арапова С. П., Арапов С. Ю., Суворова Ю. Л., 2016

Введение

Широкое распространение светотехнических устройств на основе светоизлучающих диодов (СИД) стимулирует интерес к разработке систем с такой регулировкой параметров освещения, которая была недоступна при использовании предшествующей элементной базы. Одним естественным параметром управления освещением является его яркость, другим — коррелированная цветовая температура ($T_{кл}$), которая соотносится с ощущением «холодного» или «тёплого» света и определяет его цветность.

Светодиодное освещение позволяет осуществлять регулировку яркости в широких пределах, в системах со смешиванием излучений возможно управление цветностью освещения. Однако этим возможности СИД не исчерпываются, в ряде случаев доступно управление восприятием цветов отражающих предметов за счёт эффекта кларификации[1].

Влияние спектра источника освещения на визуально воспринимаемый цвет предметов принято характеризовать индексом цветопередачи. Общий индекс цветопередачи (R_a) — показатель качества источников освещения, рекомендованный в [2]. Расчёт R_a основан на определении среднего отклонения цвета образцов из стандартного набора в равноконтрастной системе $W*U*V*$ (МКО 1960 г.), которое обусловлено сменой стандартного источника освещения на тестируемый. Индекс измеряется в безразмерных условных единицах, а максимальное возможное значение равно 100, соответствует цветопередаче без отклонений.

С началом широкого внедрения освещения на основе СИД концепция R_a подвергается постоянной критике [3–5], причиной которой, по нашему мнению, является отсутствие в методе расчёта R_a учёта искажения соотношений цветов при смене освещения. Однако, этого невозможно требовать от показателя, выраженного единственным числом. Если учесть, что для наблюдателя важнее сохранение соотношения цветов объектов, то в определённых условиях возможно вполне комфортное восприятие реальных сцен при освещении с низким R_a . Использование, например, колориметрического RGB-

3. Квалиметрия, управление качеством и стандартизация

освещения [6], может приводить к возникновению эффекта кларификации, выраженном в равномерном увеличении насыщенности взаимно-контрастных зелёных и красных цветов. В этом случае визуального дискомфорта не возникает, а снижение R_a может характеризовать степень увеличения насыщенности. Тогда R_a можно рассматривать как ещё один параметр управления освещением, отвечающим за величину эффекта кларификации, т. е. насыщенность цветов.

Цель настоящей работы — разработка метода управления светодиодными устройствами с возможностью регулировки визуально воспринимаемых параметров: «яркость освещения», «оттенок освещения ($T_{\text{кц}}$)», «насыщенность цветов освещаемых объектов (R_a)».

1. Метод управления спектром модуля RGBW

Наиболее подходящим для достижения поставленной цели является сочетание СИД RGBW. Спектры отдельных компонентов, использованных в нашей работе, и возможные результаты их смешения представлены на рис. 1. Применение четырёх СИД позволяет получить множество вариантов спектров освещения с одним цветом. Более равномерный ближе к стандартному и должен обладать более высоким R_a (рис. 1, б), следовательно, регулировку цветопередачи можно осуществлять, изменяя мощность излучения белого СИД в качестве главного управляющего параметра. Регулировка осуществляется с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ), что позволяет избежать смещения доминирующей длины волны.

Информация: передача, обработка, восприятие

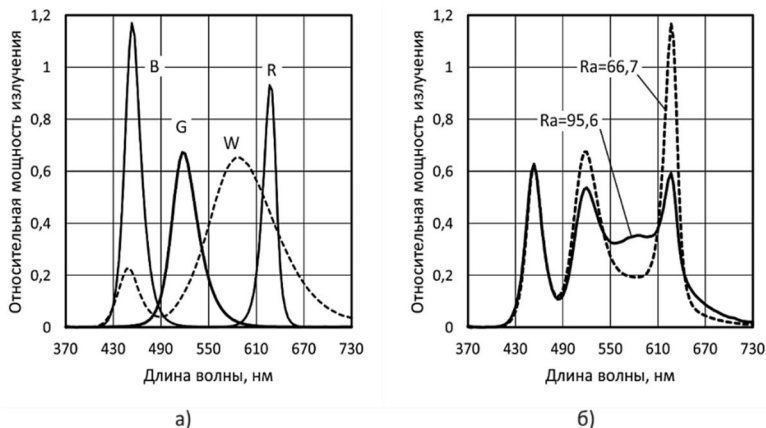


Рис. 1. Спектры излучения: а) показаны отдельные компоненты СИД RGBW, использованные в работе; б) приведены варианты смешанного излучения с одинаковой цветностью и яркостью, но с различным Ra

В основе предлагаемого метода лежит векторно-матричное представление спектров источников освещения и колориметрических расчётов. Обычно измеренные спектры представляют собой дискретные наборы значений мощности излучения для заранее фиксированного количества спектральных зон N , и их удобно считать векторами N -мерного пространства S . Если рассматриваемые процессы таковы, что исключено взаимное влияние спектральных зон, то систему из N базисных векторов, соответствующих спектральным зонам, можно условно считать ортонормированной.

В пространстве спектров S можно определить подпространство V (трёхмерную гиперплоскость) с базисом из функций сопоставления цветов (ФСЦ) какой-либо колориметрической системы, например, XYZ (МКО 1931 г). Тогда вектор, соответствующий стандартному источнику D, согласно гипотезы Вышецки [7,8], как и любой вектор из S может быть представлен в виде суммы двух векторов:

$$s_d = s_{av} + b,$$

3. Квалиметрия, управление качеством и стандартизация

где вектор s_{dv} – ортогональная проекция s_d на V , который называют фундаментальным стимулом (или метамером), b – вектор ортогональный V или метамерный чёрный. Позднее Коэном [9] был предложен явный вид оператора проекции S на V , который получил в колориметрии название R -матрицы:

$$R = X(X^T X)^{-1} X^T \quad (1)$$

где X – матрица $N \times 3$, столбцы которой образованы ФСЦ $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$.

Спектры s_l , которые могут быть получены от СИД RGBW лежат в подпространстве L с базисом из спектров компонентов s_r, s_g, s_b, s_w :

$$s_l = h_1 s_r + h_2 s_g + h_3 s_b + h_4 s_w = S_{rgbw} h, \quad (2)$$

где h_i – яркость компонентов R, G, B, W, пропорциональная скважности ШИМ электропитания СИД.

Тогда задача сводится к отысканию в L подмножества векторов, проекция которых на V совпадает с s_{dv} :

$$R s_l = R s_d. \quad (3)$$

Учитывая (1), выражение (3) можно значительно упростить и представить в виде:

$$X^T (s_l - s_d) = 0, \quad (4)$$

означающем тот факт, что разность векторов s_d и s_l должна быть ортогональна V , то есть не восприниматься наблюдателем.

С учётом (2) выражение (4) можно переписать в виде:

$$X^T (S_{rgbw} a - s_d) = X^T S_{rgbw} [h_1 \ h_2 \ h_3 \ h_4 \ h_5]^T = X^T S_{rgbw} h = 0, \quad (5)$$

где $S_{rgbw} = \begin{bmatrix} s_r & s_g & s_b & s_w & -s_d \end{bmatrix}$ – матрица, составленная из перечисленных векторов-спектров, h – вектор, содер-

жащий яркости компонентов из которых можно получить интересующие нас скважности ШИМ. Добавление дополнительной компоненты h_3 в вектор h не вносит принципиальных изменений в задачу его отыскания, ввиду её однородности. В спектре S_d стандартного источника в первую очередь важно распределение мощности по спектральным зонам, определяющее его цветность. Яркость стандартного источника, определяющаяся значением h_3 , можно считать произвольной поскольку уравнение (5) позволяет однозначно установить лишь соотношения компонент h_i , а не их абсолютные значения.

Из (5) следует, что искомый вектор h^* должен принадлежать ядру линейного оператора, заданного матрицей $X^T S_{rgbwd}$, размер которой 3×5 элементов, а ранг, очевидно, $- 3$. Таким образом, размерность ядра $- 2$, и общее решение h^* уравнения (5) можно представить в виде разложения по базису:

$$h^* = b_1 \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ a_{31} \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + b_2 \begin{bmatrix} a_{12} \\ a_{22} \\ a_{32} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = b_1 \alpha_1 + b_2 \alpha_2, \quad (6)$$

где значения a_{ij} легко находятся с помощью стандартных алгоритмов, а коэффициенты b_1 и b_2 могут быть произвольными.

Для достижения поставленной цели из множества $\{h^*\}$ всех решений уравнения (5) необходимо выбрать единственное, соответствующее заданным текущим значениям регули-

3. Квалиметрия, управление качеством и стандартизация

руемых параметров. Следует отметить что один из этих параметров – «оттенок освещения», в виде $T_{\text{кц}}$ уже неявно заложен в (6), поскольку на его основе рассчитывается вектор S_d . Что касается «яркости освещения» и «насыщенности цветов освещаемых объектов (Ra)», то для их учёта нужно обратиться к смыслу векторов α_1 и α_2 из (6).

Рассмотрим ситуацию, когда $b_1 = 0, b_2 \neq 0$. В этом случае в спектре СИД RGBW будет отсутствовать излучение белого светодиода, поскольку четвёртый элемент в α_2 равен нулю. Тогда a_{12}, a_{22}, a_{32} — яркости СИД RGB, соотношение которых обеспечивает совпадение с S_d по цветности, а их абсолютные значения — совпадение с S_d по яркости. В таком случае для регулировки яркости СИД RGB следует использовать изменение значения коэффициента b_2 в (6), которое должно происходить в пределах, соответствующих допустимому изменению скважности. Если не учитывать разрядность квантования скважности и считать её максимальное значение равным единице, то:

$$0 \leq b_2 \leq \frac{1}{\max \{a_{12}, a_{22}, a_{32}\}}, \quad (7)$$

Далее рассмотрим вектор α_1 . Следует отметить, что a_{11}, a_{21}, a_{31} всегда оказываются отрицательными. Следовательно, их значения говорят о том, на сколько следует уменьшить яркости СИД RGB при добавлении к ним СИД W с единичной яркостью чтобы избежать визуально различимого изменения освещения. Тогда значение b_1 следует использовать для регулировки «равномерности» спектра СИД RGBW, что будет соответствовать изменению Ra и «насыщенности цветов освещаемых объектов». Пределы изменения b_1 легко устано-

Информация: передача, обработка, восприятие

вить из естественного требования неотрицательности компонент решения h^* в (6), при заданном уровне b_2 :

$$0 \leq b_1 \leq \min \left\{ -b_2 \frac{a_{12}}{a_{11}}, -b_2 \frac{a_{22}}{a_{21}}, -b_2 \frac{a_{32}}{a_{31}} \right\}. \quad (8)$$

Окончательное решение выглядит следующим образом:

$$\begin{bmatrix} h_r \\ h_b \\ h_b \\ h_w \end{bmatrix} = A_{rgbw} b = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где h_i — нормированные значения яркостей СИД RGBW, изменяющиеся в пределах от 0 до 1, A_{rgbw} — матрица из элементов a_{ij} решения (6) уравнения (5), b_1 и b_2 — параметры, произвольно изменяющиеся в пределах ограничений (7–8), управляющие Ra и общей яркостью освещения.

2. Экспериментальная проверка метода

Для проверки предложенного метода собран экспериментальный стенд (Рис.2), представляющий собой светоизолирующий бокс с нейтрально-серыми стенками. Спектральный коэффициент отражения стенок контролировался спектрофотометром и составил 20 %. В качестве светодиодного модуля использовался источник света из отрезков светодиодных лент RGB и «тёплого белого» свечения, закреплённый внутри бокса на его верхней стенке.

3. Квалиметрия, управление качеством и стандартизация

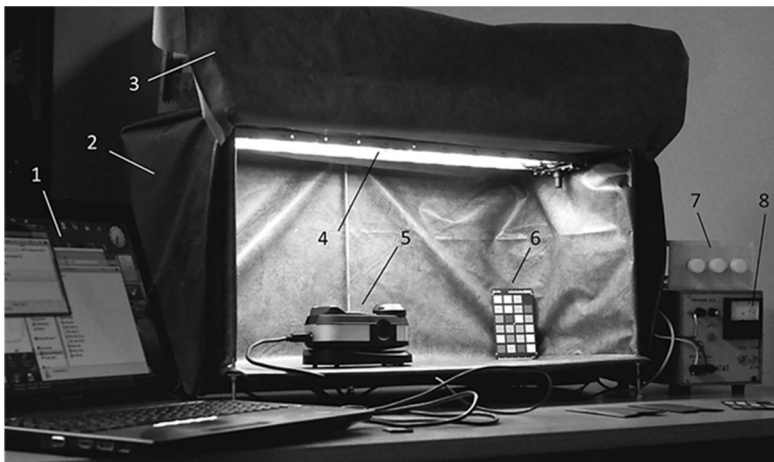


Рис. 2. Экспериментальный стенд: 1 – управляющий компьютер; 2 – светонепроницаемый бокс; 3 – светонепроницаемый полог; 4 – источник света; 5 – спектрофотометр; 6 – стандартная шкала ColorChecker; 7 – блок переменных резисторов для управления значениями $T_{\text{кц}}$, b_1 и b_2 ; 8 – стабилизированный блок питания

Питание на R, G, B, W каналы светильника подаётся через высокочастотные n каналные полевые транзисторы IRLML2502, управляемые от ШИМ выходов контроллера ATmega 328P. Частота ШИМ около 500 Гц, шаг регулировки скважности — $1/256$, соответствует 8-разрядной шкале квантования. Контроллер работает под управлением программы-монитора из программного пакета ArduinoIO позволяющей взаимодействовать с выходами контроллера из среды MATLAB, установленной на управляющем компьютере. К трём аналоговым входам контроллера подключены переменные резисторы, использующиеся для регулировки $T_{\text{кц}}$, b_1 и b_2

Спектрофотометром i1-Pro (X-Rite) в комплексе с открытым программным пакетом Argyll CMS регистрируются значения спектральной облучённости в диапазоне 370–730 нм с шагом 3,33 нм. Во время всех измерений спектрофотометр в боксе фиксируется в одном и том же положении, передняя

часть бокса закрывается светонепроницаемым пологом, а все цветные объекты из бокса удаляются. Полученные данные выражены в мВт/(м²·нм). Случайная погрешность измерений составляет 0,24 мВт/(м²·нм) для $p = 0,95$. Систематическую погрешность для данного прибора, к сожалению, указать невозможно.

Калибровка стенда заключается в последовательном измерении спектров S_r, S_g, S_b, S_w при подаче непрерывного питания (уровень ШИМ — 255) в соответствующие каналы источника света. В качестве эталона S_d берётся спектр стандартного источника серии D, который рассчитывается в процессе эксперимента в зависимости от заданной $T_{ки}$. Матрица X составляется из ФСЦ системы XYZ(10° МКО 1964), затем формируется матрица $X^T S_{rgbwd}$ из (5). Далее определяется матрица A_{rgbw} , которая используется для формирования значений уровней ШИМ по формуле (9). Поскольку яркости h_i в (9) варьируются от 0 до 1, то для получения уровней ШИМ, в нашем случае, их необходимо умножить на 255.

Эксперимент заключался в последовательном измерении спектров освещения в зависимости от значения коэффициента b_1 при различных фиксированных $T_{ки}$ и уровнях общей яркости освещения (коэффициент b_2). По спектру определялись цветность и Ra. Значения коэффициента b_1 задавались в процентах от максимально допустимого в соответствии с ограничениями (8). Результаты эксперимента представлены на рис.3.

3. Квалиметрия, управление качеством и стандартизация

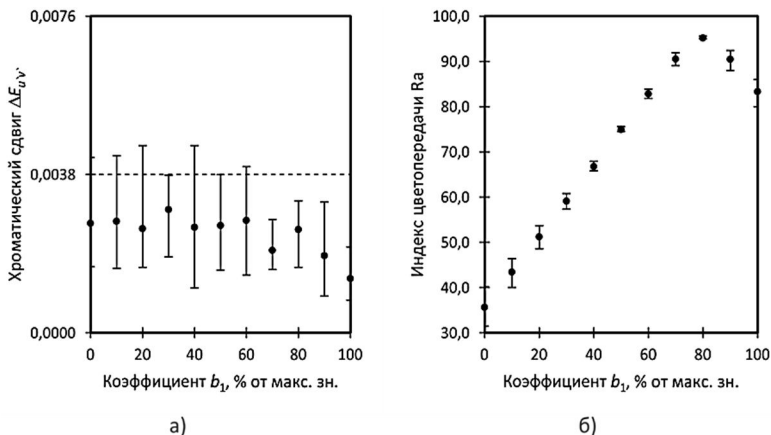


Рис. 3. Изменение характеристик светового потока СИД RGBW в зависимости от коэффициента: а) хроматического сдвига $\Delta E_{u'v'}$ (10° МКО 1964); б) индекса цветопередачи R_a . На графиках указан наблюдавшийся в эксперименте разброс значений

В ходе экспериментов при изменении коэффициента b_1 визуально наблюдались заметные отклонения цветности освещения. При этом рассчитанные по спектрам изменения цветности освещения (рис. 3, а) в целом не превышают общепринятого значения порога различимости (0,0038 по диаграмме $u'v'$ 10° МКО 1964). Предпринята попытка объяснить это несовершенством ФСЦ МКО 1964 г. по аналогии с работой [10]. Однако замена в (5) ФСЦ на более новые, полученные в соответствии с предложениями технического комитета 1–36 МКО 2006 г., не привела к существенному улучшению ситуации.

На рис. 3 б приведена зависимость R_a от значения коэффициента b_1 . Очевидно, что коэффициент b_1 в (9) отлично коррелирует со значением R_a . При значениях b_1 около 80 % от максимального наблюдается наибольшее значение R_a , после чего он начинает снижаться и дальнейшее увеличение доли белого светодиода в спектре теряет смысл. Визуальный контроль цвета отражающих объектов, помещённых в бокс показал уменьшение насыщенности при увеличении R_a и наоборот.

Выводы

Разработан метод управления СИД RGBW позволяющий регулировать $T_{кц}$, яркость, и индекс цветопередачи Ra. Регулировка Ra позволяет изменять визуально воспринимаемую насыщенность цвета отражающих объектов в зоне освещения за счёт управления эффектом кларификации.

Установлены оптимальные пределы изменения управляющего параметра. Изменение коэффициента b_1 в (9) следует ограничить в пределах от 0 до 80 % от максимального, установленного выражением (8).

В процессе экспериментов отмечено значительное изменение цветности полученного освещения, что противоречит теоретически спрогнозированным результатам. Объяснение данного факта требует дополнительных исследований.

Список литературы

1. Hunt R.W.G. The Reproduction of Colour. 6th revised edition. NJ: John Wiley & Sons, 2004. 724 p.
2. CIE 013.3-1995. Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources.
3. Schanda J. The concept of colour rendering revisited // Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision. Society for Imaging Science and Technology, 2002. Vol. 2002. P. 37–41.
4. Li C., Luo M. R., Li C. Evaluation of light sources based on visual colour rendering // Color and Imaging Conference. Society for Imaging Science and Technology, 2008. Vol. 2008. P. 201–204.
5. Park Y. Approach to CRI (Colour Rendering Index) for full colour RGB LED source lighting // Color and Imaging Conference. Society for Imaging Science and Technology, 2010. Vol. 2010. P. 371–374.
6. Арапова С. П., Арапов С. Ю., Солодова М. С. Автоматизированный лабораторный источник света для исследований цветопередачи при колориметрическом освещении // Материалы международной научно-практической конференции (Екатеринбург, 19–20 марта 2015 г.) Передача, обработка, воспри-

3. Квалиметрия, управление качеством и стандартизация

ятие текстовой и графической информации. Екатеринбург: УрФУ, 2015. С. 34–46.

7. Wyszecki G. Evaluation of metameric colors // J. Opt. Soc. Am. A. 1958. Vol. 48. P. 451–454.

8. Stiles W. S., Wyszecki G. Counting metameric object colors // J. Opt. Soc. Am. A. 1962. Vol. 52. P. 313–319.

9. Cohen J. B., Kappauf W. E. Metameric color stimuli, fundamental metamers, and Wyszecki's metameric blacks // Am J Psychol. 1982. Vol. 95. P. 537–564.

10. Шанда Я., Шути П. Улучшенное описание метамерного излучения светодиодных кластеров // Светотехника. 2009. № 6. С. 8–12.