

Подводные камни и способы настройки светодиодных систем белого света

Медхан Кумар (Madhan Kumar) и Сачин Гупта (Sachin Gupta) раскрывают секреты цветового пространства и предлагают способы точной настройки светодиодных источников белого света.



Рис. 1. Объект при освещении источниками с различным значением ИЦ

Нет сомнений в том, что цвет играет важную роль в восприятии окружающего мира. Все мы часто встречаемся с ситуациями, когда один и тот же объект при освещении отличающимися источниками света производит различное впечатление. Это свойство может быть численно охарактеризовано с помощью индекса цветопередачи (ИЦ или Colour Rendering Index, CRI), который показывает, насколько точно данный источник света отображает цвет освещаемого им объекта по сравнению с эталонным, обладающим подобной цветовой температурой. На рис. 1 продемонстрирован вид одного и того же объекта в зависимости от его освещения источниками с разными значениями ИЦ.

В домах, промышленных зданиях и архитектурной подсветке чаще всего применяются источники белого света. Поскольку каждый объект наилучшим образом интерпретируется при освещении каким-либо конкретным источником, то было бы замечательно иметь возможность точно подстраивать последний, добиваясь наибольшего эффекта. Подобная настройка в ряде областей может быть критически важной, например в медицине. В этой работе мы проанализируем характеристики белого света, а также пути и методы их задания. Но прежде чем перейти к рассмотрению настраиваемого источника белого света, сделаем краткий обзор концепции цвета. Интересно, что цвет не столь легко выразить в цифрах, как, например, температуру или плотность.

Происходит это оттого, что он зависит от многих факторов, среди которых физические свойства объекта и окружающей среды, а также характеристики глаза наблюдателя.

То, что люди воспринимают как цвет, на самом деле является электромагнитным излучением со спектром в диапазоне длин волн 390–750 нм. Человеческий глаз наблюдает каждый элемент изображения тремя типами колбочек сетчатки глаза, особыми клетками, имеющими коническую форму, служащими фотодетекторами. Интересно, что спектральный отклик каждой из этих колбочек различен. В действительности каждая колбочка умножает весь спектр на величину собственного спектрального отклика. То есть для каждой длины волны характеристического спектра его интенсивность на этой длине умножается на соответствующий отклик колбочки и результаты складываются, давая общую картину. То, что мозг в конце концов воспринимает, является комбинацией выходных сигналов от колбочек трех типов. Они обозначаются буквами L, M и S (Large, Medium and Small), отражая тот факт, что пики их спектральных откликов находятся в различных диапазонах длин волн.

Белый свет является комбинацией волн с различной длиной (рис. 2). Порядок следования компонент света по возрастанию этой величины может быть задан мнемонической группой латинских букв. В странах Соединенного Королевства используется акроним VIBGYOR,

где V (violet) — фиолетовый цвет с наименьшей длиной волны, а R (red) — красный с максимальной. Обратный порядок следования, наблюдаемый в радуге, звучит как Roy G. Biv (Рой Джи Бив. Для лучшего запоминания англоязычные дети заучивают акrostих «Richard Of York Gave Battle In Vain». В нашей стране популярна мнемодиаграмма «Каждый Охотник Желает Знать, Где Сидит Фазан». — Прим. пер.).

Вообще, белый свет может быть получен с использованием трех базовых компонент: красной, синей и зеленой. Разработчикам остается только найти их правильную пропорцию. Но даже если мы ее знаем, то на каком оборудовании собираемся ее воспроизвести так, чтобы это было понятно и приемлемо? Международная комиссия по освещению CIE (International Commission on Illumination) установила, что наиболее общим ответом на этот вопрос является использование цветового пространства xY. Оно построено на концепции того, что любой цвет в трехмерном цветовом пространстве полностью отображается своим оттенком, насыщенностью, яркостью/светимостью. И хотя понятия «яркость» и «светимость» несколько отличаются, в данном случае эту разницу учитывать мы не будем. В цветовом пространстве xY по координате x отображается оттенок, по y — насыщенность, а по Y — яркость.

Прежде чем продолжить анализ цветового пространства xY, предложенного Международной комиссией, давайте кратко рассмотрим, откуда это все пошло. В 20-х годах прошлого столетия проводились многочисленные эксперименты по описанию цвета в числах. Один из подходов был основан на отображении цвета в трех координатах R, G и B, где каждая величина связана с пропорциями трех основных

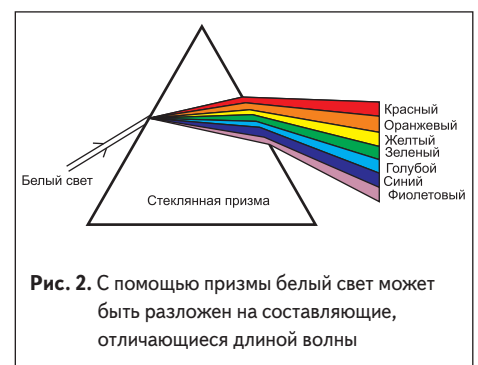


Рис. 2. С помощью призмы белый свет может быть разложен на составляющие, отличающиеся длиной волны

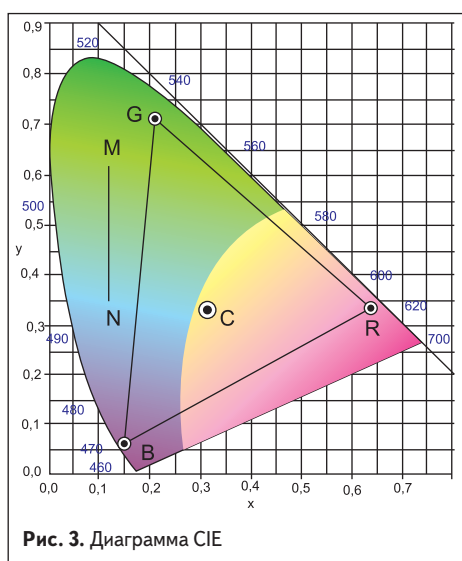
цветов (R, G и B), нужных для создания заданного цвета «С».

$$C = R.R+G.G+B.B, \quad (1)$$

где одни R, G и B отображают основные цвета, а другие R, G и B обозначают пропорцию основных оттенков, требуемую для получения «С». Однако результатом такого описания стало то, что для некоторых цветов координата R становилась отрицательной. Для преодоления этого недостатка было предложено новое цветовое пространство XYZ, где X, Y и Z являются вымышленным базисом, в котором для всех возможных оттенков ни одна из координат не является отрицательной. В этом новом представлении цвет «С» — это $X.X+Y.Y+Z.Z$, где X, Y, Z и X, Y, Z аналогичны описанным ранее R, G, B и R, G, B. В этой системе Y является как координатой, так и отображает светимость. Для простоты эти три координаты (X, Y, Z) были в дальнейшем редуцированы до двумерного пространства, где координаты цветности (x, y) определяются как:

$$x = X/X+Y+Z, \quad (2)$$

$$y = Y/X+Y+Z. \quad (3)$$



Итак, весь видимый спектр был отображен на двумерное пространство, которое получило название CIE-диаграмма (рис. 3). Y, являющаяся эквивалентом светимости, может быть представлена как вертикаль к плоскости (x, y). Любой оттенок может быть описан хроматическими координатами (x, y) и яркостью Y. Критически важным свойством диаграммы CIE является то, что любой цвет на прямой, соединяющей два оттенка, может быть получен их смешением в соответствующей пропорции. Например, любой цвет на прямой MN может быть создан путем соединения в правильном соотношении M и N. Распространяя эти соотношения на треугольник RGB (с вершинами, являющимися красным (R), зеленым (G) и синим (B) источниками света), получим, что любой оттенок, находящийся внутри него, можно

получить, правильно смешав R, G и B. Имея это в виду, давайте представим, что источники этих цветов являются светодиодами. Пусть цветовые координаты этих светодиодов будут (x_{red}, y_{red}) , (x_{green}, y_{green}) и (x_{blue}, y_{blue}) .

Если мы захотим получить цвет C с координатами (x_{mix}, y_{mix}) и светимостью Y_{mix} , то первой задачей будет проверка того, что (x_{mix}, y_{mix}) попадают в треугольник, покрываемый R, G и B. Если мы убедились в этом, то следующим шагом станет определение нужного для получения желаемого оттенка соотношения R, G и B. Существует несколько алгоритмов для его вычисления. Один из них — матричный — состоит из следующих шагов:

- Вычисление матрицы A

$$A = \begin{bmatrix} x_{red} - x_{mix} & x_{green} - x_{mix} & x_{blue} - x_{mix} \\ y_{red} & y_{green} & y_{blue} \\ y_{red} - y_{mix} & y_{green} - y_{mix} & y_{blue} - y_{mix} \\ y_{red} & y_{green} & y_{blue} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

- Определение обратной матрицы

$$A' = A^{-1}$$

- Вычисление требуемого уровня светимости для R-, G- и B-светодиодов

$$\begin{bmatrix} Y_{red} \\ Y_{green} \\ Y_{blue} \end{bmatrix} = A' \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Y_{mix} \end{bmatrix}$$

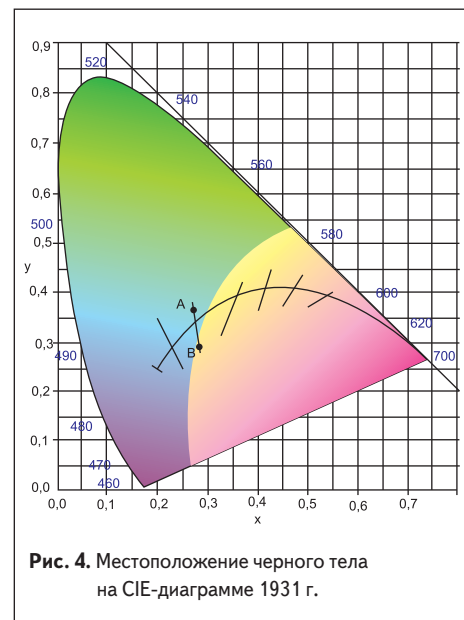
В этом выражении Y_{red} , Y_{green} и Y_{blue} — значения яркости для каждого из основных светодиодов R, G и B, необходимые для создания нужного оттенка. Данный метод обладает двумя преимуществами. Во-первых, если одно из значений Y_{red} , Y_{green} и Y_{blue} отрицательное, то это означает, что нужный цвет лежит за пределами гаммы, определенной треугольником RGB. Во-вторых, если одно из значений Y_{red} , Y_{green} или Y_{blue} оказалось больше, чем максимальный выход света, обеспечиваемый соответствующим светодиодом, то это означает, что яркость желаемого оттенка Y_{mix} слишком велика и ее необходимо уменьшить.

Представим, что для плавного регулирования яркости мы используем ШИМ-сигнал с разрешением N, тогда скважность (signal density) напряжения, управляющего красным светодиодом, может быть выражена следующим образом:

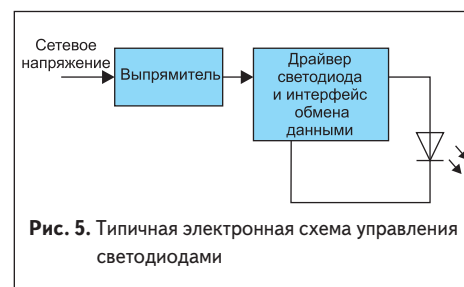
$$DimValue_{red} = (Y_{red}/Y_{max,red}) \times (2^N - 1).$$

Итак, для создания любого цвета, принадлежащего треугольнику RGB, требуются красный, зеленый и синий светодиоды с известными хроматическими координатами (x, y) и максимальной светимостью. Используя подходящий алгоритм, мы можем вычислить нужные для получения желаемого оттенка значения сигналов, регулирующих их яркость. Одним из таких алгоритмов является только что рассмотренный матричный.

Логично предположить, что и белый свет, используемый для общего освещения, тоже попадает внутрь треугольника RGB, и любой его оттенок может быть получен путем смешения в правильной пропорции красного, зеленого и синего источников. Теперь настало время представить другой важный параметр, используемый для измерения цветности белого света, — коррелированная цветовая температура (КЦТ), который базируется на понятии цветовой температуры (ЦТ). Закон Планка определяет зависимость интенсивности излучаемой абсолютно черным телом энергии от длины волны и температуры. Следовательно, для каждой ЦТ существует уникальный цвет, ассоциированный с ней, который задается ее цветовыми координатами x, y. КЦТ определяется как температура излучателя черного тела, чья цветность наиболее близка к источнику света, находящемуся на воспринимаемом однородном цветовом пространстве. На рис. 4 показано местоположение черного тела на CIE-диаграмме.



Заметим, что данная КЦТ отсылает не к какому-то одному цвету, а к хроматической линии на цветовом пространстве. Например, точки A и B имеют одинаковую КЦТ, но разные координаты x, y. Белый свет общего освещения обычно попадает в диапазон от 2000 до 10 000 К. Таким образом, входными параметрами для настраиваемой светодиодной системы белого света могут быть или координаты $x_{white}, y_{white}, Y_{white}$ или ожидаемая КЦТ. С помощью них система должна вычислить требуемые уровни сигналов, управляющих яркостью светодиодов R, G и B. На рис. 5



приведена электрическая схема типичной системы, управляющей светодиодами.

Выпрямитель используется для преобразования сетевого напряжения в постоянный ток. Обычно светодиодные установки, используемые в домашнем или архитектурном освещении, являются подчиненными устройствами и управляются от общего главного пульта. Для обмена данными в осветительных сетях чаще всего используются интерфейсы DMX и DALI. В настраиваемых системах белого света управляющее устройство посредством этих протоколов может передавать нужные значения X_{white} , Y_{white} , Y_{white} всем подчиненным установкам. Другой возможностью является передача от главного пульта значения нужной КЦТ белого цвета. И тогда уже устройствам, непосредственно командующим светодиодами, придется вычислять значения Y_{red} , Y_{green} и Y_{blue} и выдавать соответствующие управляющие сигналы.

Светодиоды имеют слабую зависимость спектральных характеристик от температуры. На практике это означает, что их координаты x , y изменяются пропорционально ей. Для настраиваемых установок белого света, когда пользователь, задав управляющие сигналы для светодиодов, хочет получить желаемый оттенок при конкретной температуре, это может быть критично. Поскольку при изменении температуры координаты x , y основных светодиодов меняются, хотя и незначительно, то и на выходе мы получаем некоторый уход от желаемого цвета. Поэтому управляющие устройства, наряду с хорошим теплоотводом, должны иметь соответствующие обратные связи, позволяющие программам, зашитым в них, в реальном времени компенсировать изменения температуры.

Есть и другой вызов разработчикам, связанный с тем, что светодиоды поставляются в различных ранках, при этом приборы, находящиеся в одном из них, демонстрируют близкие спектральные характеристики. Когда мы получаем от поставщика ряд светодиодов с конкретными цветовыми характеристиками, то они могут не принадлежать к одному ранку и, следовательно, иметь несколько отличающиеся параметры. Разработчик может либо отбирать приборы из одного ранка, что иногда довольно дорого, либо пытаться компенсировать эти различия во встроенном программном обеспечении. Это дополнительно нагружает

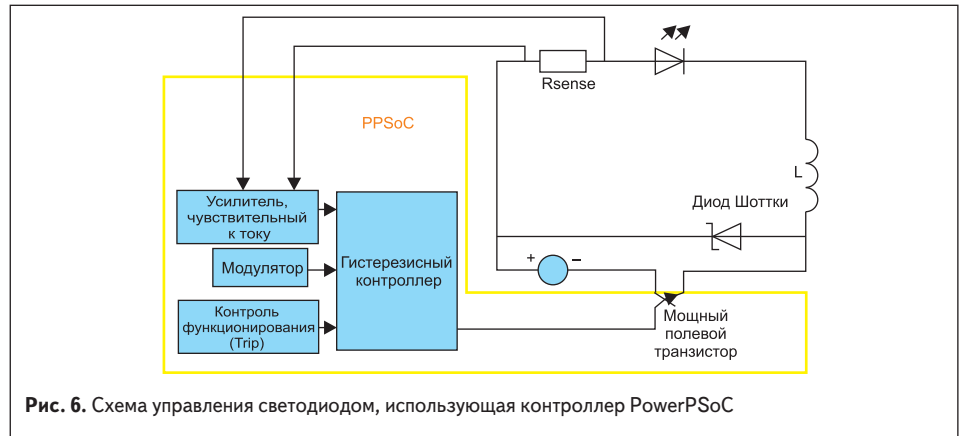


Рис. 6. Схема управления светодиодом, использующая контроллер PowerPSoC

устройство управления светодиодами, которое, кроме действующего алгоритма смешения цветов, дополненного механизмами температурной компенсации, должно реализовывать методику учета производственного разброса характеристик. Вдобавок к этому, если устройство управления светодиодами поддерживает DMX/DALI-интерфейс, то упомянутые выше программы могут соседствовать с многочисленными приложениями, реализующими его, поскольку предусматривается эффективная по цене установка их на одной микросхеме.

Существует много хорошо подходящих для управления светодиодами микроконтроллеров, имеющих встроенные MOSFET-приборы, усилители, чувствительные к току (Current Sense Amplifier, CSA), и другую периферию. Кроме того, контроллеры, работающие со смешанными сигналами, предлагают многочисленные блоки модуляции: ШИМ (PWM), SSDM (Stochastic Signal Density Modulation — стохастическая модуляция скважности) и PrISM (Precise Illumination Signal Modulation — точная модуляция сигнала для освещения). Они позволяют задавать уровни сигналов управления светодиодами. Гистерезисный контроллер (hysteretic controller), например, может организовывать обратную связь от CSA, блока модуляции и входа контроля функционирования (trip input). Последний используется для выключения канала светодиода в случае какого-либо экстремального изменения тока или напряжения. Вычисленные значения сигналов управления Y_{red} , Y_{blue} и Y_{green} могут быть поданы для управления скважностью на блоки модуляции, ответственные за каналы красных,

зеленых и синих светодиодов. Выходной сигнал с гистерезисного контроллера поступает на затвор полевого транзистора, который выполняет функцию управляющего ключа в стандартных конверторах типа Buck или Boost (стабилизированный импульсный преобразователь напряжения. — Прим. пер.). Такие контроллеры могут поддерживать число светодиодных каналов, кратное четырем. На рис. 6 показана обобщенная электронная схема типа Buck для управления одним светодиодным каналом.

Встроенное программное обеспечение, реализующее алгоритм смешения, может функционировать прямо на контроллере совместно с модулями температурной компенсации и учета технологических отклонений. Более того, там же могут работать программы DMX/DALI-интерфейса.

В завершение отметим, что возможность для пользователя точно подстраивать источник белого света из дополнительной функции, увеличивающей стоимость, превращается в необходимую. Если принять, что основным ограничивающим фактором в световых установках является пространство, то их дизайнерам следует выбирать контроллеры, реализующие все необходимые функции на одном чипе, который должен обладать необходимой для реализации алгоритма смешения вычислительной мощностью и возможностями для его бесшовной интеграции в существующую осветительную сеть.

Примечание. Оригинал статьи опубликован на сайте www.led-professional.com.