

## МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ОСВЕЩЕНИЯ

Арапова С.П., Арапов С.Ю., Дубинин И.С., Солодова М.С.  
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
пр. Мира, 32, Екатеринбург, Свердловская обл., 620002, Россия,  
тел.: (343) 375-46-30, e-mail: arapova66@yandex.ru

*Аннотация* — предложен метод «ведущего компонента» для управления мультиспектральными источниками освещения. Он основан на регулировании энергетической яркости одного из спектральных компонентов. Остальные компоненты источника подстраиваются для достижения требуемого спектрального состава или сохранения цветности. Для определения яркостей подстраиваемых компонентов используются линейно-алгебраические методы. Приведены примеры практического использования полученных результатов в специализированных лабораторных осветителях.

## CONTROL METHOD FOR MULTISPECTRAL LIGHT SOURCE<sup>1</sup>

Arapova S.P., Arapov S.Yu, Dubinin, I.S. Solodova M.S.  
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin  
pr. Mira, 32, Yekaterinburg, Sverdlovsk region, 620002, Russian Federation  
ph.: (343) 375-46-30, e-mail: arapova66@yandex.ru

*Abstract* — a method is proposed for the «master component» to control the multispectral light sources. It is based on the regulation of the energy brightness of one of the spectral components. The remaining components of the source are adjusted to achieve the desired spectral composition, or preserve color. To determine brightness adjustable components use linear-algebraic methods. Examples of practical use of the results obtained in a specialized laboratory lighting.

### I. Введение

Управление яркостью хроматических светоизлучающих диодов (СИД) в лабораторных источниках света (ЛИС) изменяет его спектр и может быть реализовано различными способами. В работе [1] используются задвижки, регулирующие интенсивность излучения СИД, изменяется количественный и качественный состав одновременно включённых СИД. Наряду с качественным составом СИД, изменение спектров ЛИС возможно за счёт рабочих токов [2–5]. В работах [2, 3, 5] основное внимание уделяется оптимизации качественного состава СИД, перестройка спектров за счёт подбора рабочих токов рассматривается как дополнительная возможность. В работе [4] управление спектром ЛИС производится за счёт регулирования тока СИД, большое внимание уделяется моделированию происходящих при этом изменений их спектров.

Наиболее простым вариантом управления ИК является широтно-импульсная модуляция (ШИМ). Примеры таких устройств приведены в [6–12]. Частота ШИМ в таких ЛИС составляет 400–500 Гц (в [6] 10 кГц). Этого вполне достаточно для задач изучения визуального восприятия, однако в других приложениях может сказаться на результатах (например, при фото-видео съёмке с короткими выдержками). К преимуществам ШИМ следует отнести большую стабильность формы спектрального распределения СИД при регулировке яркости.

В перечисленных работах, за исключением [4, 10, 12], не даётся подробного описания алгоритмов, лежащих в основе программного обеспечения (ПО) регулирующих устройств, не приводятся расчётные методы и формулы. В тоже время опыт разработок [4, 7, 8, 10–12], говорит о близости подходов к расчёту управляющих воздействий (рабочих токов, уровней ШИМ). Обобщённое формальное изложение общих приёмов

решения таких задач представляет интерес для разработчиков мультиспектральных ЛИС.

Таким образом целью данной работы является систематизация имеющихся [4, 7, 10–12] алгоритмов управления световыми потоками (энергетической яркостью) ИК в мультиспектральных ЛИС и их обобщение в метод.

### II. Общая постановка задачи

Общая схема ЛИС представлена на рис.1. Световые потоки излучателей после смешивания поступают в рабочую зону ЛИС, где размещаются экспериментальные материалы. Для калибровки и контроля используется спектрофотометр. В качестве цели для имитации обычно берутся стандартные осветители серии D при заданной коррелированной цветовой ( $T_{\text{кц}}$ ) температуре, или планковский излучатель (абсолютно чёрное тело).

Поскольку в данной работе рассматривается метод управления, детали реализации отдельных подсистем не столь важны. Будем считать, что подсистема смешивания световых потоков обеспечивает равномерность спектрального состава во всей рабочей зоне. Спектральные измерения осуществляются спектрофотометром, снабжённым косинусной корректирующей насадкой при зафиксированном положении и ракурсе.

Система регулирования позволяет изменять энергетические яркости компонентов и сумма их спектров  $s_i(\lambda)$  определяет спектр  $s(\lambda)$  в рабочей зоне. Например, для четырёх ИК (как показано на рис.1):

$$s(\lambda) = a_1 s_1(\lambda) + a_2 s_2(\lambda) + a_3 s_3(\lambda) + a_4 s_4(\lambda) \quad (1)$$

где  $a_i$  — индивидуальные нормированные яркости ( $0 \leq a_i \leq 1$ ). Выражение (1) подразумевает, что форма спектрального распределения отдельных компонентов не изменяется при изменении яркости, что характерно для ШИМ-регулирования.

Задача заключается в отыскании таких значений  $a_i$ , чтобы  $s(\lambda)$  наилучшим образом

соответствовал заранее заданному целевому осветителю по заданному критерию.

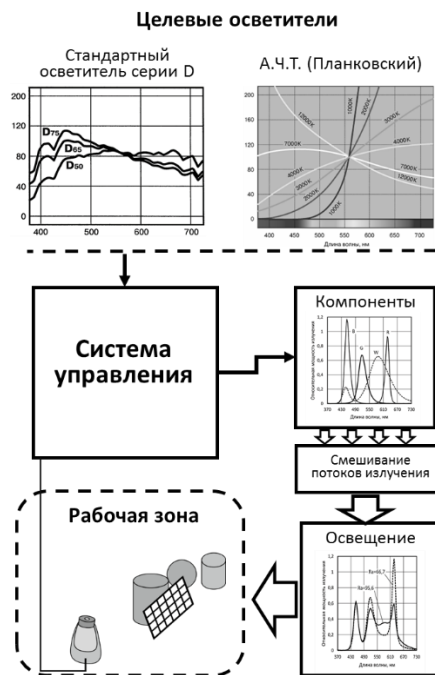


Рис. 1. Типичная общая схема лабораторных источников света (ЛИС)

### III. Элементы метода

**Первым элементом метода** является представление спектральных распределений величин в виде векторов в многомерном пространстве, размерность которого совпадает с количеством рассматриваемых спектральных зон. Это позволяет применять к задачам стандартные методы геометрии и линейной алгебры. Выражение (1) при таком подходе можно записать в матрично-векторной форме:

$$s = S_{1234}a, \quad (2)$$

где  $s$  — вектор-столбец спектра в рабочей зоне,  $S_{1234} = [S_1 S_2 S_3 S_4]$  — матрица, столбцы которой являются спектрами ИК,  $a = [a_1 a_2 a_3 a_4]^T$  — вектор-столбец нормированных яркостей.

Такой подход использован во множестве работ (например, [4, 10, 12, 13]). При этом обычно упускается важный момент в обосновании его применимости, а именно взаимную независимость физико-химических процессов, протекающих в различных спектральных зонах. Если это так, то базис спектрального пространства можно считать ортонормированным.

**Вторым элементом метода** является выделение из спектрального пространства подпространств, соответствующих ЛИС и наблюдателю, которые определяются через соответствующие базисы. В подпространстве ЛИС таким базисом является множество спектров ИК, а его элементами — их всевозможные линейные комбинации (2). При этом реальным спектрам ЛИС соответствуют лишь те из них, для которых соблюдаются условия, определяющие его физические возможности:

$$(0 \leq a_i \leq 1) \quad (3)$$

Как будет показано далее, ограничения (3) можно не принимать во внимание практически до самого финального этапа решения задачи.

Подпространство наблюдателя является трёхмерным и определяется базисом, составленным из спектральных функций сопоставления цвета (ФСЦ) стандартного наблюдателя. Поскольку речь идёт о ИС, следуя большинству действующих стандартов, обычно выбираются  $10^\circ$  ФСЦ, принятые Международной комиссией по освещению (МКО) в 1964 г. В настоящее время также доступны уточнённые  $10^\circ$  ФСЦ (МКО 2006).

**Третьим элементом метода** являются операторы  $\hat{R}$  ортогональной проекции на выделенные подпространства. В спектральном пространстве таким операторам соответствуют квадратные вырожденные матрицы  $R$ , которые легко строятся из базисов подпространств. Например, для подпространства ЛИС со спектрами (2):

$$R_S = S_{1234}(S_{1234}^T S_{1234})^{-1} S_{1234}^T = S_{1234} S_{1234}^+, \quad (4)$$

где  $(\dots)^+$  — обозначает операцию псевдообращения матрицы Мура-Пенроуза. Применение данного проектора к произвольному спектру позволяет найти наилучшее среднеквадратичное приближение, которое может быть получено в данном ЛИС.

Матрица оператора проекции на подпространство наблюдателя хорошо известна в колориметрии и носит название -матрицы (Козна):

$$R = X(X^T X)^{-1} X^T = X X^+, \quad (5)$$

где  $X = [\bar{x} \ \bar{y} \ \bar{z}]$  — матрица, столбцами которой являются, например, спектральные значения ФСЦ стандартного наблюдателя  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  в системе XYZ (МКО 1964). Умножение произвольного спектра на  $R$ -матрицу Козна выделяет из него часть, непосредственно воспринимаемую наблюдателем, и называющуюся «фундаментальным метамером», (ФМ). Разность между спектром и его ФМ не воспринимается наблюдателем, поэтому она получила название «метамерный чёрный» (МЧ). Возможность разложения произвольного спектрального стимула на перечисленные составляющие была сформулирована в работе [14] и получила название «гипотезы Вышецки».

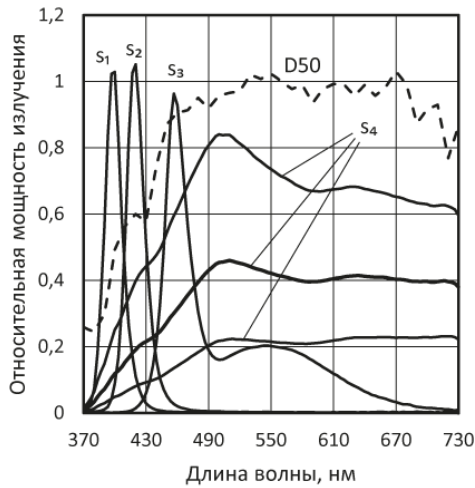
Следует отметить, что само применение терминов «ортгональность», «ортгоналная проекция» предполагает «евклидовость» изначального спектрального пространства, и лишней раз указывает на важность обоснования ортонормированности его базиса, введённого выше.

**Четвёртым элементом метода** является операция масштабирования векторов в спектральном пространстве. Классическая колориметрия предполагает, что умножение векторов-спектров на произвольную константу приводит лишь к изменению визуально-воспринимаемой яркости, при неизменной цветности. Очевидно, что также сохраняется форма спектра.

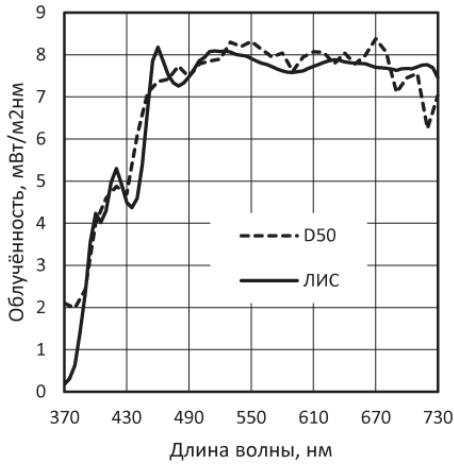
### IV. Примеры алгоритмов

#### Пример 1. Наилучшее спектральное приближение

В работе [12] рассматривается гибридный ЛИС, составленный из разнородных ИК. Спектры ИК приведены на рис. 2. Требуется получить спектр максимально близкий по форме к спектру  $S_D$  стандартного источника серии D при заданной  $T_{кц}$ .



а)



б)

Рис. 2. Спектры ИК и результат решения задачи

а) — спектры ИК  $S_1, S_2, S_3, S_4$ , спектр ГЛН  $S_4$  изменяется нелинейно в зависимости от параметров электропитания; б) — спектр полученный в результате решения. На графиках также показано целевое спектральное распределение D50.

Особенностью набора ИК является наличие галогенной лампы (ГЛН) с интерференционным фильтром. Её спектр нелинейно зависит от электропитания, и необходимо предварительно определиться со значением питающего напряжения, чтобы спектр  $S_4$  наилучшим образом подходил для решения задачи.

Выделяем расширенное подпространство спектров источника:

$$s^* = S_{1234} a^*, \quad (6)$$

где  $s^*$  — спектр в рабочей зоне,  $S_{1234} = [S_1 S_2 S_3 S_4]$  — матрица, спектров ИК,  $a^* = [a_1^* a_2^* a_3^* a_4^*]^T$  — вектор произвольных нормированных яркостей ИК.

Далее строим ортопроектор в подпространство (6):

$$R_S = S_{1234} (S_{1234}^T S_{1234})^{-1} S_{1234}^T = S_{1234} S_{1234}^+ \quad (7)$$

После этого легко находится наилучшее спектральное приближение  $s_d^*$  в расширенном подпространстве ЛИС, и соответствующий вектор яркостей  $a_d^*$ :

$$s_d^* = R_S s_D, \quad a_d^* = S_{1234}^+ s_D^* \quad (8)$$

В конце выполняем масштабирование полученного решения без ущерба для формы спектра.

Поскольку четвертый элемент в  $a_d^*$  отвечает за яркость нерегулируемой ГЛН, его следует выбрать в качестве делителя остальных элементов. Тогда искомый вектор нормированных яркостей будет выглядеть так:

$$a_d = [a_{d1} \ a_{d2} \ a_{d3} \ 1]^T = \begin{bmatrix} a_{d1}^* & a_{d2}^* & a_{d3}^* \\ a_{d4}^* & a_{d4}^* & a_{d4}^* \end{bmatrix}^T, \quad (9)$$

Остаётся лишь проверить условие (3). Если один из элементов  $a_{d1}, a_{d2}, a_{d3}$  больше единицы, следует внести изменения в конструкцию ЛИС, увеличив мощность соответствующего ИК.

### Пример 2. Регулировка Индекса цветопередачи (Ra) при сохранении цвета освещения

В работе [10] рассматривается задача управления ЛИС на основе СИД RGBW с возможностью регулировки удобных для наблюдателя параметров: яркость освещения, оттенок освещения ( $T_{кц}$ ), насыщенность цветов освещаемых объектов (Ra). Присутствие в этом наборе Ra обусловлено стремлением к получению избирательного контроля над степенью проявления эффекта кларификации [8, 15, 16] или «приукрашивания» [9] при сбалансированном узкополосном освещении СИД. Применение этого подхода в промышленных и бытовых ЛИС даёт наблюдателю возможность самостоятельно определять комфортный для себя уровень насыщенности цветов [17] в окружающей обстановке. Спектры ИК приведены на Рис.3.

Предполагается что управление Ra осуществляется изменением доли излучения  $s_w$  белого светодиода в общем спектре  $s_{led}$ . Задача заключается в определении таких нормированных яркостей ИК R, G и B, чтобы координаты цвета ЛИС (X, Y, Z) оставались при этом постоянными. Целевым осветителем  $s_D$  для определения цветности выбирался осветитель серии D.

В начале решения строим подпространство ЛИС с базисом из спектров компонентов  $s_r, s_g, s_b, s_w$ :

$$s_{led} = a_1 s_r + a_2 s_g + a_3 s_b + a_4 s_w = s_{rgbw} a, \quad (10)$$

где  $a_i$  — яркости ИК (R, G, B, W). Тогда задача сводится к отысканию в множестве  $\{s_{led}\}$  векторов, проекция которых на подпространство наблюдателя совпадает с проекцией  $s_D$ :

$$R s_{led} = R s_D \quad (11)$$

Учитывая (5), выражение (11) можно значительно упростить и представить в виде:

$$X^T (s_{led} - s_D) = 0, \quad (12)$$

означающем тот факт, что разность векторов  $s_{led}$  и  $s_D$  должна быть ортогональна подпространству наблюдателя, то есть не восприниматься им. С учётом (10) выражение (12) можно переписать в виде:

$$\begin{aligned} X^T (s_{rgbw} a - s_D) &= \\ &= X^T s_{rgbw} [h_1 \ h_2 \ h_3 \ h_4 \ h_5]^T = \\ &= X^T s_{rgbw} h = 0, \end{aligned} \quad (13)$$

где  $s_{rgbw} = [s_r \ s_g \ s_b \ s_w \ -s_d]$  — матрица, составленная из перечисленных векторов-спектров,

$\mathbf{h}$  — некий вектор, содержащий яркости ИК и являющийся промежуточным результатом. Добавление дополнительной компоненты  $\mathbf{h}_5$  в вектор  $\mathbf{h}$  не вносит принципиальных изменений в задачу. В спектре  $s_D$  стандартного источника важно распределение мощности по спектру, задающее его цветность. Яркость стандартного источника, определяющуюся значением  $\mathbf{h}_5$ , можно считать произвольной поскольку уравнение (13) позволяет однозначно установить лишь соотношения компонент  $\mathbf{h}_i$ , а не их абсолютные значения. По сути введение в задачу компоненты  $\mathbf{h}_5$  является «допустимым масштабированием».

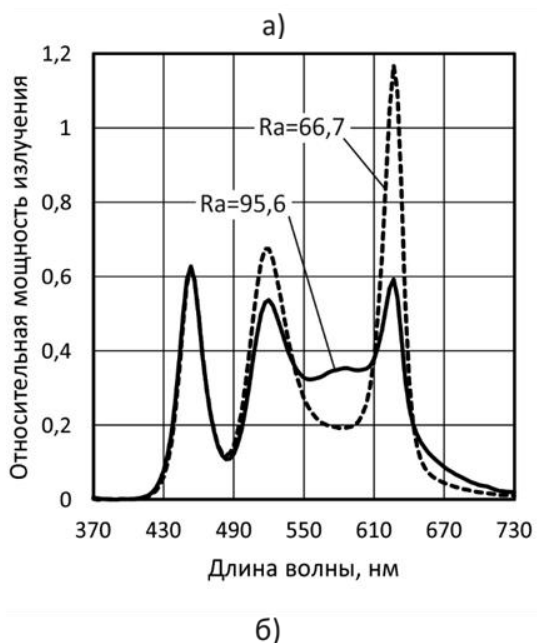
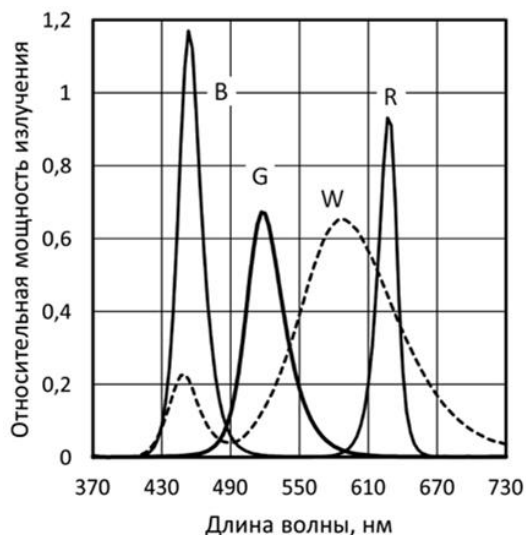


Рис.3. Спектры излучения

а) — отдельные компоненты СИД RGBW, использованные в работе [10]; б) — варианты смешанного излучения с одинаковой цветностью и яркостью, но с различным Ra.

Из (13) следует, что искомый вектор  $\mathbf{h}^*$  должен принадлежать ядру линейного оператора, заданного матрицей  $X^T S_{rgbw}$ , размер которой  $3 \times 5$  элементов, а ранг, очевидно, — 3. Таким образом, размерность ядра — 2, и общее решение  $\mathbf{h}^*$  уравнения (5) можно представить в виде разложения по базису:

$$\mathbf{h}^* = k_1 \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ b_{31} \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + k_2 \begin{bmatrix} b_{12} \\ b_{22} \\ b_{32} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = k_1 \boldsymbol{\beta}_1 + k_2 \boldsymbol{\beta}_2, \quad (14)$$

где значения  $b_{ij}$  легко находятся с помощью стандартных алгоритмов, а коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$  могут быть произвольными.

Из множества  $\{\mathbf{h}^*\}$  (14) всех решений уравнения (13) необходимо выбрать единственное, соответствующее заданным текущим значениям регулируемых параметров. Следует отметить что один из этих параметров — «оттенок освещения», в виде  $T_{кц}$  уже неявно заложен в (12–14), 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  $\boldsymbol{\beta}_1$  и  $\boldsymbol{\beta}_2$ , из (14).

Рассмотрим ситуацию, когда  $k_1 = 0$ ,  $k_2 \neq 0$ . В этом случае в спектре СИД RGBW будет отсутствовать излучение белого светодиода, поскольку четвёртый элемент в  $\boldsymbol{\beta}_2$  равен нулю. Тогда  $b_{12}, b_{22}, b_{32}$  — 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  $k_2$  в (14), которое должно происходить в пределах, соответствующих физическим возможностям ИС. Поскольку максимальное значение индивидуальной нормированной яркости ИК в составе ЛИС равно единице, то:

$$0 \leq k_2 \leq \frac{1}{\max\{b_{12}, b_{22}, b_{32}\}}, \quad (15)$$

Далее рассмотрим вектор  $\boldsymbol{\beta}_1$ , где  $b_{11}, b_{21}, b_{31}$  всегда оказываются отрицательными. 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  $k_1$  следует использовать для регулировки «равномерности» спектра СИД RGBW, что будет соответствовать изменению Ra и «насыщенности цветов освещаемых объектов». Пределы изменения  $k_1$  легко установить из естественного требования неотрицательности компонент решения  $\mathbf{h}^*$  в (6), при заданном уровне  $k_2$ :

$$0 \leq k_1 \leq \min \left\{ -k_2 \frac{b_{12}}{b_{11}}, -k_2 \frac{b_{22}}{b_{21}}, -k_2 \frac{b_{32}}{b_{31}} \right\}. \quad (16)$$

Ограничения (15–16) получены в результате «масштабирования» решения (14) в соответствии с физическими возможностями ИС. Окончательное:

$$\begin{bmatrix} a_r \\ a_g \\ a_b \\ a_w \end{bmatrix} = \mathbf{V}_{rgbw} \mathbf{k} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

где  $a_i$  — искомые значения нормированных яркостей СИД RGBW, изменяющиеся в пределах от 0 до 1,  $\mathbf{V}_{rgbw}$  — матрица из элементов  $b_{ij}$  решения (14) уравнения (13),  $k_1$  и  $k_2$  — параметры, произвольно изменяющиеся в пределах ограничений (15–16), управляющие Ra и общей яркостью освещения.

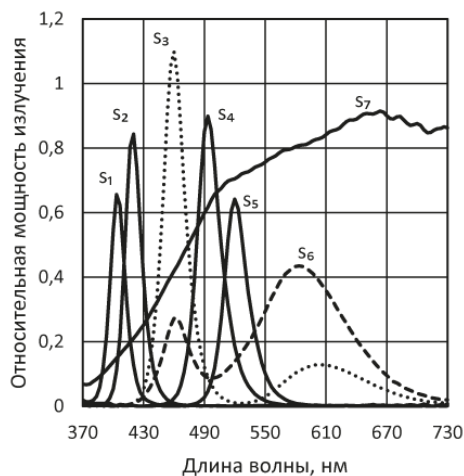
### Пример 3. Наилучшее спектральное приближение при условии соблюдения заданной цветности

В данном подразделе рассматривается модификация гибридного ЛИС из примера 1. Состав

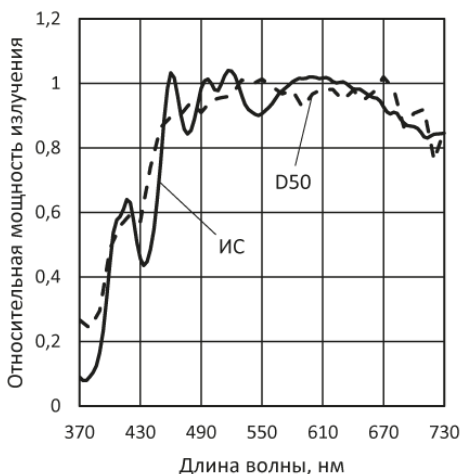
ИК был дополнен голубыми и зелёными СИД для улучшения равномерности спектра, а также СИД тёплого белого свечения, что позволило отказаться от перекального режима ГЛН. Спектры ИК приведены на рис.4.

Как видно из сравнения рис. 2 и рис. 4, спектры ГЛН сильно различаются. Это обусловлено конструкцией светильника, полностью интегрирующего рабочий световой поток ГЛН, в то время как в примере 1 из него отбиралась лишь центральная часть. Модификации сделаны для увеличения полного светового потока ЛИС.

Целью является получение светового потока, совпадающего по цветности со стандартным источником D при заданной  $T_{кц}$  (как того требуют публикация МКО 051.2-1999 и ISO 3664:2009), при этом среди возможных спектров необходимо выбрать самый близкий по форме к соответствующему спектру  $s_D$ .



а)



б)

Рис. 4. Спектры ИК и результат решения задачи  
а) — спектры ИК  $s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6$  и спектр ГЛН  $s_7$ ;  
б) — спектр ИС, полученный в результате решения. Также показано целевое спектральное распределение D50.

Первый шаг решения — построение «расширенного» подпространства спектров источника включая нерегулируемую ГЛН:

$$s_d^* = S_{ИК} a^*, \quad (18)$$

где  $S_{ИК} = [s_1 \ s_2 \ s_3 \ s_4 \ s_5 \ s_6 \ s_7]$  — матрица, спектров ИК,  $a^*$  — вектор нормированных яркостей. Составляем матрицу  $S_{ИК,d} = [S_{ИК} \ -s_D]$ , и из уравнения, аналогичного (13):

$$X^T S_{ИК,d} h = 0, \quad (19)$$

получаем промежуточное пространство  $\{h\}$  согласованных наборов яркостей ИК образующих метамеры целевого источника D в расширенном подпространстве спектров ИС:

$$h = Bk = k_1 \beta_1 + k_2 \beta_2 + k_3 \beta_3 + k_4 \beta_4 + k_5 \beta_5, \quad (20)$$

где  $\{\beta_i\}$  — базис  $\{h_i\}$ ,  $k$  — произвольный вектор коэффициентов,  $B$  — матрица столбцы которой  $\beta_i$ :

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Для продолжения решения требуется перейти от базиса яркостей  $\{\beta_i\}$  к соответствующему базису  $\{m_i\}$  множества метамеров целевого источника D в спектральном пространстве. По аналогии с выражением (17) создаём матрицу  $\tilde{B}$  из матрицы  $B$ , путём вычёркивания последней строки, и находим матрицу  $M$ :

$$M = S_{ИК} \tilde{B}, \quad (21)$$

столбцы которой являются базисными векторами  $m_i$ . Теперь можно определить ортопроектор на это подпространство метамеров:

$$R_M = M(M^T M)^{-1} M^T = M M^+, \quad (22)$$

и найти в нём наилучшее спектральное приближение  $s_d$ , а также его координаты  $k$  в базисе  $\{m_i\}$ :

$$s_d = R_M s_D \text{ и } k = M^+ s_D. \quad (22)$$

Индивидуальные нормированные яркости ИК для непосредственного управления ЛИС получаются подстановкой вектора  $k$  в (20) и такого масштабирования  $h$ , чтобы значение яркости «ведущего» компонента — ГЛН, было равно единице. Необходим также стандартный контроль условий (3).

## V. Заключение

Таким образом есть основания говорить о совокупности представленных решений как о методе. С одной стороны, у рассмотренного комплекса элементов и действий налицо типовые свойства алгоритма (массовость, результативность, детерминированность), с другой — в целом идёт речь о более общем объекте, в рамках которого существуют конкретные решения-алгоритмы с индивидуальными особенностями.

Процессная составляющая этого метода заключается в целенаправленном, последовательном построении необходимых подпространств и проекций моделируемого спектра после чего производится масштабирование полученного решения к возможностям источника.

Масштабирование осуществляется по заданному значению яркости одного из компонентов, называемого «ведущим».

## VI. Литература

- [1] Даулинг К. и др. Осветительная установка НИСТ с регулируемым спектром для исследований в области цветопередачи // Светотехника. 2009. № 5. С. 37–40.
- [2] Бадгутдинов М.Л. и др. Светодиодный модуль с регулируемой цветовой температурой // Светотехника. 2008. № 6. С. 15–17.
- [3] Гутцайт Э.М. и др. К моделированию стандартных источников света светодиодами модулями // Светотехника. 2013. № 4. С. 61–66.
- [4] Finlayson G. et al. On calculating metamer sets for spectrally tunable LED illuminators // J. Opt. Soc. Am. A. 2014. Vol. 31, № 7. P. 1577.
- [5] Гальчина Н.А. и др. Светодиодное устройство с улучшенной цветопередачей // Светотехника. 2013. № 1. С. 32–34.
- [6] Аладов А.В. и др. Полихромные спектрально-перестраиваемые осветительные приборы со светодиодами: опыт разработки и применения // Светотехника. 2013. № 5–6. С. 34–39.
- [7] Солодова М.С. и др. Автоматизированный лабораторный источник освещения для колориметрических исследований // Сборник докладов Международной конференции «Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления». Екатеринбург: УрФУ, 2015. С. 4–12.
- [8] 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, восприятие текстовой и графической информации». Екатеринбург: УрФУ, 2015. С. 34–46.
- [9] Лебедкова С.М., Лузина Ю.А. Исследование эффекта «приукрашивания» цвета разносpekтральными излучениями // Светотехника. 2016. № 1. С. 25–30.
- [10] Арапова С.П., Арапов С.Ю., Суворова Ю.Л. Метод управления индексом цветопередачи для светодиодных модулей RGBW // Материалы международной научно-практической конференции (Екатеринбург, 12–13 января 2016 г.) «Информация: передача, обработка, восприятие». Екатеринбург: УрФУ, 2016. С. 91–103.
- [11] Арапова С.П., Арапов С.Ю., Мезенцева С.А. Управляемый мультиспектральный светодиодный кластер для репродукционных исследований // Материалы международной научно-практической конференции (Екатеринбург, 12–13 января 2016 г.) «Информация: передача, обработка, восприятие». Екатеринбург: УрФУ, 2016. С. 104–111.
- [12] Арапов С.Ю., Арапова С.П., Тягунов А.Г. Гибридный лабораторный источник света для полиграфии, спектрально близкий к стандартным излучателям «D» // Светотехника. 2016. № 2. С. 24–28.
- [13] Мартынюк М.В. Оценка границ областей метамерии для набора светочувствительных приёмников // Труды НГТУ, 2012. №3 (96). С. 81–90.
- [14] Wyszecki G. Evaluation of metameric colors // J. Opt. Soc. Am. A. 1958. Vol. 48. P. 451–454.
- [15] Арапова С.П., Арапов С.Ю., Москвичёв С.А. Применение эффекта кларификации в полиграфии // Материалы международной научно-практической конференции (Екатеринбург, 12–13 января 2016 г.) «Информация: передача, обработка, восприятие». Екатеринбург: УрФУ, 2016. С. 82–90.
- [16] Арапова С.П. и др. Автоматизированный просмотровый комплекс для исследований цветопередачи при RGB-светодиодном освещении // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2015. № 6. С. 3–11.
- [17] Миллер К. и др. Зрительный эксперимент по определению предпочтительной насыщенности цвета // Светотехника. 2015. № 5. С. 12–18.