

Методы оптимизации синтезирования спектров настраиваемых многоцветных источников света¹

Н. КАРЛИ¹, А. СПЕРЛИНГ², Г. БИЗЯК^{1,3}

¹ Люблянский университет, Любляна, Словения

² Национальный физико-технический институт, Брауншвейг, Германия

³ E-mail: grega.bizjak@fe.uni-lj.si

Аннотация

Описан метод синтезирования спектра излучения настраиваемого многоцветного источника света (НМИС) (*tunable colour light source*). НМИС представляет собой способный имитировать различные спектральные распределения СД источник света, который можно использовать, например, для реализации спектров различных стандартных излучений МКО. Синтезирование спектра излучения сводится, в сущности, к приведению спектра излучения НМИС в соответствие с желательным спектром. Кроме того, это относится к так называемым задачам с ограничениями, т.к. результирующий спектр формируется посредством сложения взвешенных спектров используемых источников света (например, одноцветных СД), и «отрицательный свет» при этом отсутствует. Поэтому нельзя воспользоваться обычными методами оптимизации, такими как метод наименьших квадратов. Прогрессивный метод синтезирования, в основу которого был положен метод оптимизации с ограничениями, был разработан и проверен на лабораторном образце НМИС, предназначенном для использования в целях калибровки. Разработанный метод синтезирования, который описан в данной статье, приводит к хорошим результатам, однако сравнение его с более простыми методами демонстрирует возможность успешного использования и этих методов.

Ключевые слова: СД, настраиваемый многоцветный источник света, синтезированное спектральное распределение энергии излучения, метод наименьших квадратов с ограничениями.

1. Введение

Настраиваемые многоцветные источники света (НМИС) (*tunable colour light source*) подходят для выполнения многих задач и могут использоваться как в лабораториях, так и в повседневной жизни. В сущности, НМИС представляют собой многоканальные источники света на основе СД, способные имитировать спектральные распределения энергии излучения (СРЭИ) разных источников света, в том числе и спектры различных стандартных излучений МКО, даже тех, которые описываются исключительно при помощи математических моделей.

Спектры современных источников света на основе СД существенно отличаются от спектров классических источников света. Для уменьшения неопределённости измерений новых изделий с СД, измерительное оборудование (фотометры) следует калибровать с использованием не только источников света, реализующих спектр стандартного источника A МКО, но и источников света, генерирующих излучение со спектром, очень близким к спектру измеряемого изделия. Поэтому НМИС окажется очень полезным для фотометрических лабораторий, а так как он служит для имитации любого выбранного спектра, то его можно использовать для калибровки оборудования с непостоянным спектром излучения, тем самым уменьшая количество используемых в лаборатории различных эталонных источников света. Но так как он будет использоваться для калибровки, то важно, чтобы подобный лабораторный НМИС мог воспроизводить различные СРЭИ с заданными и стабильными фотометрическими или колориметрическими характеристиками, такими как яркость, коррелированная цветовая температура, координаты цветности (x , y) или индекс цветопередачи.

Для того, чтобы иметь возможность использовать описанный в [1] НМИС для калибровки и проведения исследований, в нём был установлен новый набор СД, и была написана новая управляющая программа. Основным предназначением НМИС будет калибровка измерительных приборов применительно к совокупности различных спектров, так что НМИС должен обеспечить возможность быстрой и точной реализации желательного спектра.

Основным элементом управляющей программы является процесс синтезирования спектра излучения НМИС. Этот процесс должен обеспечить наилучшее возможное решение, в рассматриваемом случае – в приемлемо короткое время реализовать спектр излучения, который должен быть наиболее близок к желательному. Т.к. спектр излучения НМИС должен быть очень близок к желательному, то в основу процесса синтезирования был положен метод оптимизации, в рамках которого различие между синтезируемым и желательным спектрами использовалось в качестве критерия оптимизации. Разработка и апробация процесса синтезирования описаны ниже.

2. Синтезирование спектра

В основу СД НМИС была положена идея создания устройства, способного сформировать любой желательный спектр в спектральном диапазоне, охватываемом СД. Первый вариант НМИС был реализован при помощи интегрирующей сферы, снабжённой 24-мя разными так называемыми монохроматическими СД, формирующими окружность вокруг выходного отверстия сферы, так чтобы освещать её заднюю часть. Хотя эти СД и называют монохроматическими, они на самом деле излучают в пределах узкого диапазона длин волн с полной шириной на уровне половины максимума 15–35 нм (см. рис. 3).

СД расположены таким образом, что их нельзя увидеть непосредственно из выходного отверстия. Как показано на рис. 1, выходное отверстие НМИС снабжено экранирующей трубкой, содержащей 4 апертуры для минимизации попадания в сферу рассеянного света окружающей среды. Внутри сферы спектры используемых СД смешиваются в результате многократ-

¹ Перевод с англ. Е.И. Розовского

ных диффузных отражений, и выходное отверстие обеспечивает доступ к равномерно светящейся области, аппроксимирующей синтезированный спектр. Многоканальный источник постоянного тока используется для индивидуального управления каждым из СД посредством изменения значения силы тока. Источник постоянного тока соединён с персональным компьютером при помощи универсальной интерфейсной шины, позволяющей управлять светодиодами при помощи компьютерной программы. Кроме того, в сфере имеется отверстие для оптоволоконного кабеля спектрометра, который подключён к этому же персональному компьютеру. Измеренные спектральные данные обрабатываются управляющей программой, написанной в среде *LabVIEW*, и могут использоваться не только для контроля, но и для управления излучением НМИС.

Было опубликовано много статей, посвящённых как СД НМИС, так и тому, как обеспечить максимально возможное совпадение синтезированного спектра с желательным. Многие исследования были посвящены попыткам найти наилучший способ имитации спектров различных стандартных излучений МКО и других излучений. В [2] был предложен настраиваемый многоцветный источник света, в котором использовались СД, излучающие в диапазоне длин волн 380–780 нм, и простой, но медленный итерационный алгоритм оптимизации. В [3] для минимизации различий между оптимизированным и желательным спектрами было предложено использовать отсекку, удаляющую ненужные СД и, тем самым, позволяющую получить оптимальный набор СД. Приведённые в этой статье результаты представляются очень многообещающими, однако нам не удалось воссоздать эту методику, т.к. в упомянутой статье не все стадии были описаны полностью. В [4] было предложено использовать для нелинейной оптимизации спектра изучения системы СД основанный на радиальных базисных функциях стохастический алгоритм, который включал в себя минимизацию цветовых различий.

Все использовавшиеся в упомянутых статьях алгоритмы были основаны на методе оптимизации Гаусса, базирующемся на минимизации суммы квадратов разностей между

Рис. 1. Реализация НМИС при помощи интегрирующей сферы и 24 СД, расположенных вокруг выходного отверстия

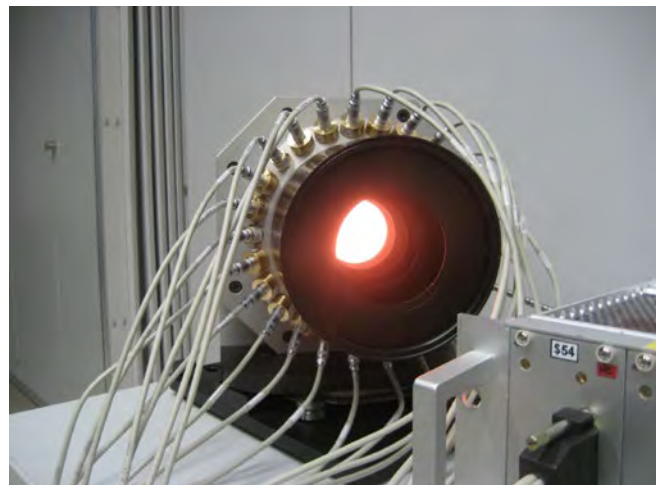
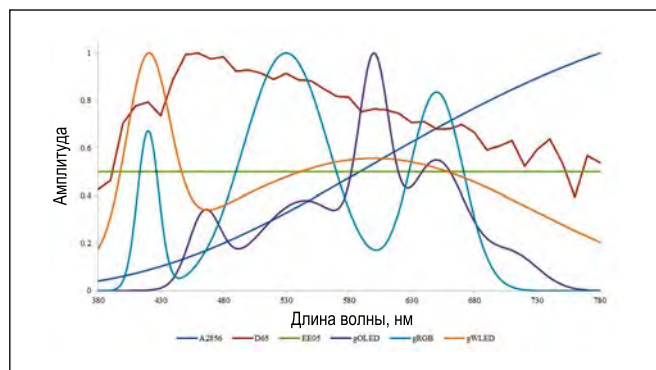


Рис. 2. Шесть различных желательных спектров, использовавшихся для проверки методов оптимизации НМИС



синтезированным спектром НМИС и желательным спектрами. На самом деле, хотя метод наименьших квадратов и обеспечивает оптимальный результат, он, в то же время, содержит ряд отрицательных коэффициентов, которые нельзя реализовать в случае НМИС, т.к. в этом случае коэффициенты соответствуют излучению СД, и отрицательные значения этих коэффициентов означали бы «отрицательное» излучение, которое следовало бы вычесть из синтезированного света, что физически невозможно. Так что требовалось найти усовершенствованный или иной метод оптимизации, который обеспечил бы наилучший результат с учётом того, что рассчитанные коэффициенты должны быть положительными или равными нулю.

С другой стороны, метод оптимизации Гаусса, который является основным математическим методом определения коэффициентов уравнения наилучшего приближения (или, по меньшей мере, их начальных значений), очень прост. Согласно [5], метод оптимизации Гаусса можно использовать и для получения решения при наличии ограничений, но только в случае, если удастся правильно и должным образом задать эти ограничения.

Возможность использовать метод оптимизации Гаусса для решения задач методом наименьших квадратов с ограничениями типа линейных неравенств позволила нам заложить этот метод в основу нашего алгоритма синтеза.

3. Методы оптимизации с ограничениями

В литературе описано много различных методов оптимизации, включающих в себя те или иные ограничения. В [6] описаны основные проблемы, связанные с уменьшением размерности в области словарного обучения (*dictionary learning*). В этой работе основное внимание было уделено разработке новых алгоритмов составления словарей подпространств (*dictionaries of subspaces*), обеспечивающих эффективное представление разных классов сигналов. Так как ключевыми моментами решения связанных со словарным обучением задач являются разреженные ограничения (*sparsity constraints*), то все они основаны на разреженных аппроксимациях (*sparse approximation*). В [7] было проведено исследование метода оптимизации, целью которого была ми-

минимизация ошибки реконструкции и количества СД источников света при помощи изложенных в [6] методов разреженного кодирования. В [5] был описан алгоритм решения неотрицательной задачи наименьших квадратов (НЗНК), который оказался оптимальным для неотрицательных задач с определёнными ограничениями типа неравенств. В [8] был предложен быстрый алгоритм решения задачи методом наименьших квадратов с ограничениями в части неотрицательных коэффициентов, в основу которого был положен стандартный алгоритм решения НЗНК [5]. В ряде случаев, он сходится быстрее, однако в своей основе он остался почти таким же. В то же время, в [9] была описана выложенная в свободный доступ написанная на языке СИ реализация решения задачи методом наименьших квадратов с ограничениями типа неравенств. Точность расчётов по этой программе соответствует точности функции *lsqnonneg* в Матлаб [10], которая, опять же, основана на описанном в [5] методе. Описанная в [9] программа работает намного быстрее, чем функция *lsqnonneg*, и лучше подходит для очень обширных задач.

Так как метод НЗНК использовался во многих работах для решения самых разных задач, то можно считать, что этот метод обеспечивает оптимальное решение неотрицательной задачи наименьших квадратов с определёнными ограничениями типа неравенств. Так что мы воспользовались им для оптимизации спектров излучения НМИС. Ниже приведены краткое описание алгоритма решения задачи наименьших квадратов методом Гаусса и обзор основных алгоритмов, в которых используется метод НЗНК.

3.1. Метод оптимизации Гаусса

Алгоритм Гаусса используется для решения нелинейных задач методом наименьших квадратов. Этот метод называют «методом наименьших квадратов», потому что при этом минимизируется сумма квадратов отклонений. В случае НМИС отклонения представляют собой соответствующие разным длинам волн разности между полученным спектром излучения НМИС и желательным спектром излучения. Спектр излучения НМИС, который обозначается как $S_o(\lambda)$, синтезируют

при помощи спектров M СД, так что его можно записать в виде:

$$S_o(\lambda) = \sum_{i=1}^M k_i \cdot S_i(\lambda), \quad (1)$$

где $S_i(\lambda)$ – СРЭИ i -го СД, k_i – соответствующие весовые коэффициенты, а M – количество СД в наборе. СРЭИ используемых СД следует указать для выбранных длин волн, например, с шагом 1 нм в диапазоне от 380 до 780 нм, если мы хотим использовать НМИС только в видимой области спектра. Если обозначить желательный спектр, как $S_t(\lambda)$, то функцию невязки R , которая представляет собой сумму квадратов разностей между желательным и синтезированным спектрами, можно записать в виде:

$$R = \sum_{\lambda=380}^{780} (S_t(\lambda) - S_o(\lambda))^2, \quad (2)$$

Воспользовавшись уравнением (1), можно записать R , как:

$$R = \sum_{\lambda=380}^{780} \left[S_t(\lambda) - \sum_{i=1}^M k_i \cdot S_i(\lambda) \right]^2, \quad (3)$$

или в виде матрицы:

$$R = \| \mathbf{S}_t - \mathbf{S}_{LED} \mathbf{K} \|^2, \quad (4)$$

где \mathbf{S}_t – желательный спектр, представленный в виде вектора с составляющими, соответствующими выбранным длинам волн, \mathbf{K} – вектор весовых коэффициентов, а \mathbf{S}_{LED} – матрица, сформированная из спектров используемых СД для тех же длин волн, что и \mathbf{S}_t . В случае диапазона длин волн от 380 до 780 нм и шага, равного 1 нм, векторы \mathbf{K} и \mathbf{S}_t являются 401-мерными, а матрица \mathbf{S}_{LED} состоит из 401 x M элементов:

$$\mathbf{S}_{LED} = \begin{bmatrix} d_1(1) & d_2(1) & \dots & d_M(1) \\ d_1(2) & d_2(2) & \dots & d_M(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_1(401) & d_2(401) & \dots & d_M(401) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $d_n(i)$ – энергия излучения n -го СД на i -ой длине волны.

Выражение (4) описывает переопределённую систему 401 линейных уравнений с M неизвестными. Согласно Гауссу и Лежандру, вектор \mathbf{K} , минимизирующий уравнение (4), можно записать в виде:

$$\mathbf{K} = (\mathbf{S}_{LED}^T \cdot \mathbf{S}_{LED})^{-1} \cdot \mathbf{S}_{LED} \cdot \mathbf{S}_t, \quad (6)$$

где

$$(\mathbf{S}_{LED}^T \cdot \mathbf{S}_{LED})^{-1} \cdot \mathbf{S}_{LED} = \mathbf{S}_{LED}^+, \quad (7)$$

– псевдообратная матрица Мура-Пенроза [11–13], полученная из матрицы спектров \mathbf{S}_{LED} .

К сожалению, при синтезировании спектра излучения НМИС полученный вектор \mathbf{K} может как оказаться, так и не оказаться оптимальным решением, т.к. в общем случае \mathbf{K} может содержать некоторое количество отрицательных коэффициентов, а это означает, что соответствующие СД должны излучать отрицательное количество света. А т.к. это невозможно, то такой оптимальный спектр излучения нельзя реализовать на практике. Поэтому следует ввести в расчёты дополнительные ограничения: оптимальным будет тот спектр излучения, которому соответствуют наименьшее значение R и только положительные значения весовых коэффициентов.

3.2. Алгоритм решения НЗНК

В результате мы имеем так называемую неотрицательную задачу наименьших квадратов, которую в общем случае можно сформулировать следующим образом:

$$\begin{aligned} &\text{минимизировать } \|\mathbf{Ax} - \mathbf{b}\| \\ &\text{при условии } \mathbf{x} \geq 0, \end{aligned} \quad (8)$$

где \mathbf{A} – матрица размером $m \times n$ ($m \geq n$), \mathbf{b} – m -мерный вектор исходных данных, а \mathbf{x} – n -мерный вектор решения. Оптимальное решение системы линейных уравнений $\mathbf{Ax} \approx \mathbf{b}$ требуется найти при условии $\mathbf{x} \geq 0$. В нашем случае матрица \mathbf{A} представляет собой матрицу спектров использованных (и измеренных) СД (\mathbf{S}_{LED}), n – количество СД, а $m = 401$ – размерность векторов СРЭИ, измеренных с шагом 1 нм в диапазоне длин волн от 380 до 780 нм. Вектор \mathbf{b} соответствует желательному спектру \mathbf{S}_t и имеет ту же

размерность $m = 401$, а \mathbf{x} представляет собой оптимальное решение, в нашем случае – оптимальные весовые коэффициенты \mathbf{K} .

НЗНК может быть решена при помощи разных алгоритмов. Первый широко применяемый алгоритм, который был описан в [5], состоял из девяти шагов. Процесс начинается с приравнивания всех составляющих \mathbf{x} к нулю, формирования набора \mathbf{Z} , содержащего все индексы, и пустого набора \mathbf{P} . В основном цикле с использованием текущего значения \mathbf{x} производится расчёт градиентного вектора \mathbf{w} :

$$\mathbf{w} = \mathbf{A}^T (\mathbf{b} - \mathbf{A}\mathbf{x}). \quad (9)$$

Если набор \mathbf{Z} пуст или если все составляющие \mathbf{w} , индексы которых присутствуют в \mathbf{Z} , имеют значения ≤ 0 , то у нас уже есть решение, так что процесс завершается. В ином случае, на следующем шаге максимальную составляющую \mathbf{w} перемещают из \mathbf{Z} в \mathbf{P} . Если хотя бы одна из составляющих имеет отрицательную величину, то в качестве пробного решения можно рассматривать только часть \mathbf{Z} . Так что нужно найти индекс q , такой, чтобы

$$\alpha = \frac{x_q}{(x_q - z_q)}. \quad (10)$$

оказалось минимальным из всех подобных выражений для отрицательных составляющих \mathbf{Z} . При помощи соответствующего этому q значения α можно записать линейную сумму

$$\mathbf{x} = \mathbf{x} + \alpha(\mathbf{z} - \mathbf{x}). \quad (11)$$

На последнем шаге все индексы, соответствующие которым составляющие x равны нулю, перемещают из \mathbf{P} в \mathbf{Z} . Это относится к x_q , но может охватывать и другие составляющие. По окончании процесса получаем вектор весовых коэффициентов \mathbf{P} .

В конце не все составляющие x оказываются положительными и содержатся в \mathbf{P} . Часть из них остаются в \mathbf{Z} , имея значение нуль. В случае НМИС это означает, что не все СРЭИ будут участвовать в формировании синтезированного спектра излучения. Нужные СД будут запитаны требуемыми токами, определёнными на основе

содержащихся в \mathbf{P} (или, в нашем случае, в \mathbf{K}) значений весовых коэффициентов, а остальные будут выключены, т.к. соответствующие им весовые коэффициенты равны нулю.

3.3. Другой, более простой метод получения оптимального решения

Хотя описанный математический метод и не очень сложен, он может вызвать некоторые затруднения при реализации его применительно к некоторым простым НМИС, например, управляемым микроконтроллерами. Даже в случае его реализации в среде *LabVIEW* для управления НМИС, у нас возникли некоторые затруднения, и управляющая программа работала довольно медленно. Поэтому мы проверили ряд более простых методов оптимизации.

Эти дополнительные методы были разработаны для облегчения расчётов в *LabVIEW* или даже в среде микроконтроллера. Для уменьшения времени расчётов метод оптимизации Гаусса использовался только вначале. Как описано в 3.1, основной проблемой метода оптимизации Гаусса является то, что вектор оптимальных коэффициентов, который описывается уравнением (6), может содержать отрицательные составляющие, которые нельзя реализовать на практике. Поэтому в качестве первого приближения из используемого набора СД нужно исключить те СД, которым соответствуют отрицательные коэффициенты, и синтезировать спектр излучения при помощи только тех СД, которым соответствуют положительные коэффициенты. Это очень простой и быстрый метод, однако в большинстве случаев он приводит к не очень хорошим результатам: так как при этом для синтеза желательного спектра используется лишь небольшое количество СД, то невязка R , которая описывается уравнением (4), в большинстве случаев оказывается довольно большой.

Помимо базового метода, в рамках которого все СД с отрицательными значениями коэффициентов исключаются сразу, мы также проверили четыре других метода, в рамках которых подобные СД исключаются шаг за шагом, до тех пор, пока в наборе останутся только СД с положительными коэффициентами, а ме-

тод оптимизации Гаусса будет давать только положительные весовые коэффициенты. Первые три метода пошагового исключения СД с отрицательными значениями весовых коэффициентов отличаются друг от друга только способом исключения первых таких СД. В случае первого метода сначала исключали СД с самым отрицательным значением весового коэффициента. В случае второго метода первым исключали СД с наименьшим по абсолютному значению отрицательным весовым коэффициентом. В случаях третьего и четвёртого методов просто исключали первый или, соответственно, последний из списка СД с отрицательными значениями весовых коэффициентов. В конце итерационного процесса, когда все коэффициенты, полученные методом оптимизации Гаусса, оказываются положительными, можно при помощи уравнения (1) получить синтезированный спектр излучения, в формировании которого примут участие только СД с положительными значениями весовых коэффициентов.

3.4. Сравнение методов оптимизации

Все описанные методы были опробованы на лабораторном НМИС с использованием двух разных наборов СД. Так как размер сферы ограничен, то количество СД в наборе не может быть больше, чем 24. Все СД из первого набора были монохроматическими, и их выбирали таким образом, чтобы их СРЭИ были, по возможности, равномерно распределены по всей видимой области спектра (380–780 нм). Такое распределение позволяет получать непрерывные синтезированные спектры, способные, по меньшей мере, в принципе, оказаться близкими к различным желательным спектрам. Если при синтезировании спектра соответствующие определённым СД весовые коэффициенты оказывались равными нулю, то и токи этих СД были равны нулю. Поэтому такие СД не горели, хотя и продолжали входить в состав НМИС. Это полезно, если предполагается использовать НМИС для синтеза более чем одного желательного спектра. Так что какой-то СД может быть выключен при формировании одного синтезированного спектра и включён при формировании другого синтезированного спектра. Если

Пиковые длины волн и относительные мощности пиков излучения 24-х отобранных СД

СД	Пиковая длина волн, нм	Относительная мощность пика	СД	Пиковая длина волн, нм	Относительная мощность пика
1	380	0,042	13	590	0,390
2	388	0,361	14	599	0,116
3	405	0,463	15	628	0,648
4	424	0,900	16	654	0,069
5	431	0,943	17	666	0,099
6	456	0,645	18	692	0,086
7	466	1	19	707	0,071
8	492	0,500	20	721	0,058
9	498	0,341	21	739	0,044
10	513	0,213	22	762	0,023
11	531	0,131	23	774	0,018
12	520	0,550	24	780	0,003

Таблица 2

Пиковые длины волн и относительные мощности пиков излучения белых СД

СД	Коррелированная цветовая температура, К	Пиковая длина волны, нм	Относительная мощность пика
Тёпло-белый	3500	572	0,0339
Холодно-белый	8700	451	0,1516

расчёты показывают, что один из весовых коэффициентов равен нулю для всех желательных спектров, то этот СД может быть исключён из набора, так как он не влияет ни на один из желательных спектров. В этом случае в НМИС может быть установлен другой СД. Один такой СД был выявлен при первой реализации нашего НМИС, и впоследствии его заменили на белый СД.

Для проведения первых испытаний НМИС был снабжён 24-мя мо-

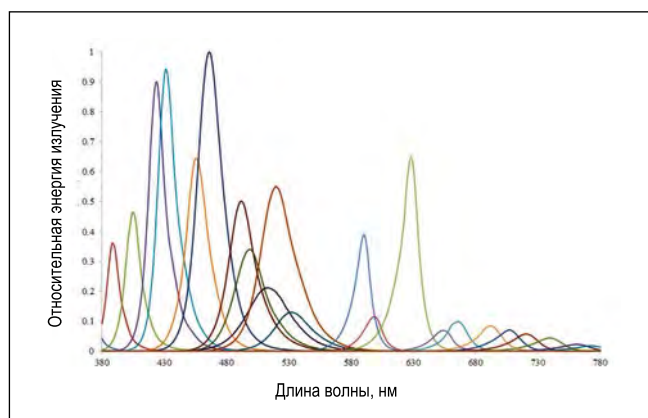
нохроматическими СД. Его испытали применительно к шести желательным спектрам источников света разных типов: стандартным источникам света *A (A2856)* и *D65 (A2856)* МКО, равноэнергетическому источнику излучения (*EE 05*), типичному источнику света с органическими светодиодами (*gOLED*), типичному *RGB* источнику света (*gRGB*) и типичному СД источнику холодно-белого света (*gWLED*). Соответствующие желательные относительные спектральные распределе-

ния излучения приведены на рис. 2. Спектры 24-х отобранных монохроматических СД из первого набора приведены на рис. 3.

Как можно заметить на рис. 3, имеется нехватка подходящих СД с пиковыми длинами волн, лежащими в «зелёной» области спектра в интервале 520–590 нм. Как и ожидалось, это привело к тому, что в этой конкретной области синтезированный спектр довольно значительно отличался от желательного.

В третьем и шестом столбцах табл. 1 для демонстрации различий между отдельными СД из набора 1 приведены относительные мощности их пиков излучения. Спектры масштабировали применительно к максимальной для всех них спектральной мощности излучения. Т.к. СД с пиками в интервале длин волн 650–780 нм имеют небольшие по сравнению с прочими СД мощности излучения, то максимальные полные световые потоки НМИС в случае некоторых синтезированных спектров также могут оказаться очень небольшими. Первые

Рис. 3. Относительные спектральные распределения излучения 24 СД, использовавшихся для создания НМИС, измеренные при номинальном токе СД. Спектры масштабированы таким образом, чтобы величина наибольшего пика была равна 1



Сравнение результатов, полученных использовавшими методами применительно к двум наборам СД
(в таблице представлены рассчитанные значения функции невязки R)

Синтезированный спектр	$A2856$	$D65$	$EE05$	$gOLED$	$gRGB$	$gWLED$
Набор из 23 монохроматических СД (№ 24 не использовался)						
НЗНК	5,6745	15,725	5,847	3,9593	5,805	7,23419
Все отрицательные коэффициенты приравнены 0	132,94	868,42	262,0	92,380	278,2	252,666
Сначала удаляется СД с наиболее отрицательным коэффициентом	5,6745	15,725	5,847	3,9593	5,805	7,23419
Сначала удаляется СД с наименее отрицательным коэффициентом	5,6824	15,839	5,888	4,1399	5,993	7,26875
Сначала удаляется первый СД с отрицательным коэффициентом	5,6824	15,839	5,888	3,7566	5,206	7,26875
Сначала удаляется последний СД с отрицательным коэффициентом	5,6745	15,725	5,847	3,9593	5,805	7,23419
Набор из 22 монохроматических и двух белых СД						
НЗНК	1,6819	2,6235	1,118	1,3999	2,916	1,71788
Все отрицательные коэффициенты приравнены 0	2,8366	9,5895	3,235	3,9093	6,052	4,28758
Сначала удаляется СД с наиболее отрицательным коэффициентом	1,6819	2,6499	1,124	1,3999	2,916	1,72942
Сначала удаляется СД с наименее отрицательным коэффициентом	1,6837	2,8188	1,227	1,4000	2,926	1,85828
Сначала удаляется первый СД с отрицательным коэффициентом	1,6819	2,6235	1,118	1,3999	2,916	1,71788
Сначала удаляется последний СД с отрицательным коэффициентом	1,6837	2,6499	1,124	1,3999	2,916	1,72942

измерения показали, что пик излучения 24-го СД был очень мал, а его пиковая длина волны 780 нм оказалась практически за пределами видимого диапазона. Так как полный световой поток НМИС зависит не только от выбранного желательного спектра, но и от пиковых мощностей излучения использовавшихся СД, то упомянутый 24-ый СД всегда вносил довольно небольшой вклад в полный световой поток. Поэтому этот СД не использовался в большинстве испытаний и был впоследствии заменён.

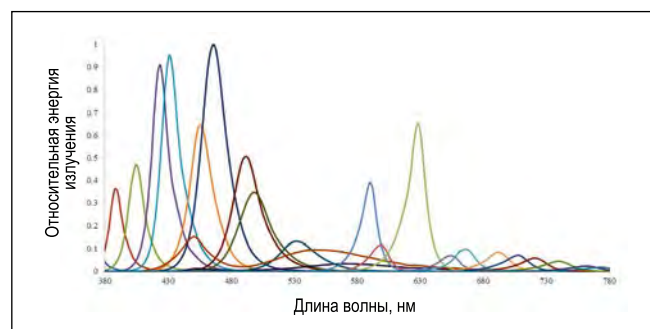
В процессе проведения первоначальных испытаний было установлено, что минимизацию отклонений от желательного спектра в диапазоне между 520 и 590 нм можно обеспечить при помощи двух белых СД (тёпло-белого и холодно-белого света). Поэтому на втором этапе в набор были включены два СД с люминофором, один тёпло-белого света и один холодно-белого света (табл. 2). Однако из-за ограниченности количества мест для СД

в сфере, для этого потребовалось удалить из первоначального набора два СД. Мы удалили СД № 12, весовой коэффициент которого был равен нулю для всех синтезированных в процессе испытаний спектров, и СД № 24, который не вошёл в большинство синтезированных спектров по причине своего очень низкого светового потока. Как показано на рис. 4, выбранные белые СД действительно захватывают спектральный диапазон 520–590 нм.

Все описанные методы оптимизации были испытаны применительно-

но к обоим наборам СД. В качестве желательных использовались спектры, показанные на рис. 2. Сравнение полученных результатов проведено в табл. 3. Метод НЗНК использовался для выявления самых малых различий (самых малых значений функции невязки R) между синтезированными с помощью обоих наборов СД и желательными спектрами, и, тем самым, ему соответствовали наилучшие результаты. Для обоих наборов СД результаты, полученные при использовании по меньшей мере одного другого

Рис. 4. Относительные спектральные распределения излучения 24 СД из набора 2, в котором два монохроматических СД были заменены на СД тёпло-белого и холодно-белого света



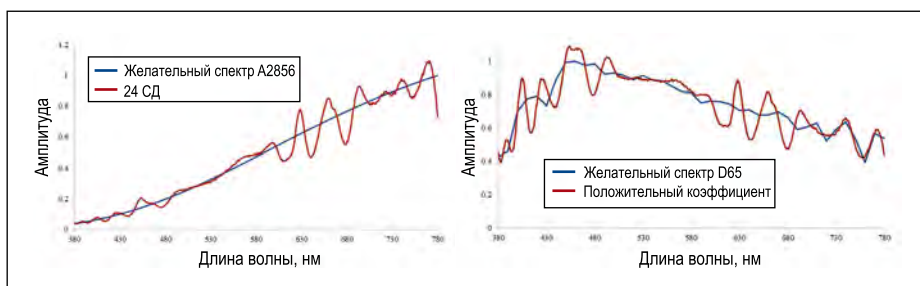


Рис. 5. Результаты синтеза спектров источников A (слева) и D65 (справа) МКО

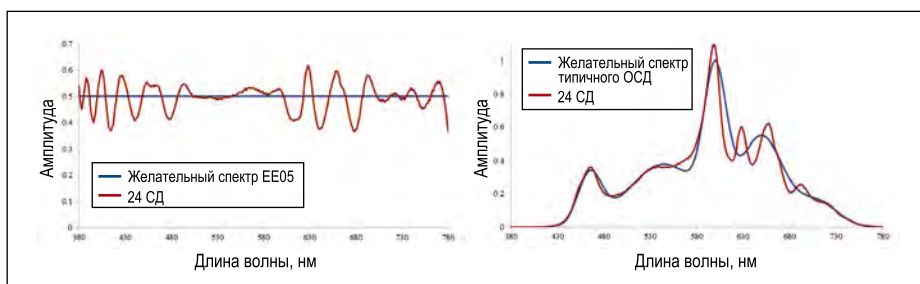


Рис. 6. Результаты синтеза равноэнергетического спектра (слева) и спектра типичного ОСД (справа)

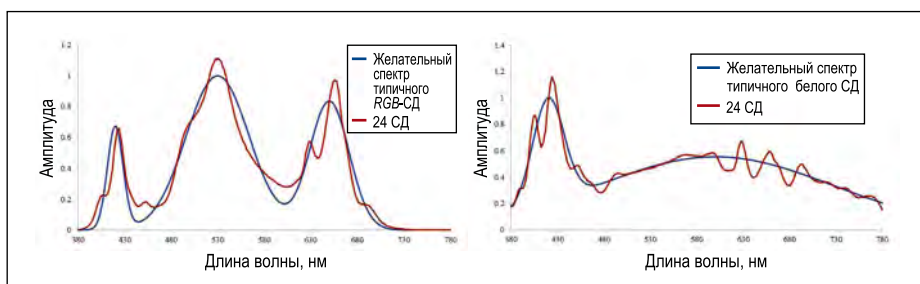


Рис. 7. Результаты синтеза спектров типичных RGB-СД (слева) и белого СД (справа)

(с улучшенной продолжительностью расчётов) метода расчётов (с использованием различных вариантов исключения СД), равноценны результатам, полученным при использовании метода НЗНК. Применительно к первому набору СД, наилучшие результаты были также получены при использовании двух уменьшающих продолжительность расчётов методов, а именно, метода, предусматривающего исключение в первую очередь СД с наиболее отрицательным значением весового коэффициента, и метода, предусматривающего исключение в первую очередь последнего СД из списка с отрицательными значениями весового коэффициента. Применительно ко второму набору СД, наилучшие результаты были получены ещё и при использовании метода, предусматривающего исключение в первую очередь первого СД из списка с отрицательными значениями весовых коэффициентов. Другие методы не приводят к получению сопоставимых результатов.

4. Результаты

В табл. 3 фоном выделены наилучшие результаты, которым соответствуют наименьшие значения функции невязки. Согласно результатам, полученным в ходе проведения испытаний, описанный выше метод НЗНК обеспечил наилучшие результаты и, соответственно, наименьшие отклонения от желательного спектра при использовании обоих наборов СД. Сравнимые результаты не были получены только при использовании метода, предусматривающего одномоментное исключение всех СД с отрицательными значениями весовых коэффициентов после первого же расчёта значений этих коэффициентов, так как в этом случае значения функций невязки оказались намного большими для всех синтезированных спектров. Наряду с методом НЗНК могут с равным успехом использоваться и сберегающие время расчётов методы оптимизации, так

как в большинстве случаев результаты, полученные при использовании этих методов, совпадают с результатами, полученными методом НЗНК, или близки к ним. В частности, очень многообещающим представляется метод, предусматривающий исключение в первую очередь СД с наиболее отрицательным значением весового коэффициента. Он намного быстрее и даёт хорошие результаты, почти все из которых соответствуют результатам, полученным методом НЗНК.

Полученные в результате оптимизированные спектры показаны на рис. 5–7. Все они получены при помощи метода оптимизации НЗНК, применённого ко второму набору СД, состоящему из 22 монохроматических и 2 белых СД.

5. Заключение

Целью описанных в данной статье исследований было выявление оптимального математического метода, позволяющего по возможности максимально приблизить совокупный спектр излучения многочисленных СД источников света к желательному. В результате проведённого анализа литературных данных, был выбран метод поиска оптимального решения неотрицательной задачи наименьших квадратов с определёнными ограничениями типа неравенств, который был опробован применительно к формированию шести желательных спектров. Описанный метод оптимизации, основанный на алгоритме решения НЗНК, представляется очень полезным, тем более что он позволил получить наилучшие результаты применительно к обоим исследовавшимся наборам СД. Как ни странно, результаты, полученные при помощи гораздо более простых методов, которые описаны в разделе 3.3, в большинстве случаев приводят к таким же результатам, как и полученные при помощи очень сложного метода НЗНК, или к очень похожему на них результатам. Как и ожидалось, единственным методом, приведшим к получению намного худших результатов, был метод, в рамках которого уже на первом шаге процесса оптимизации из действующего набора СД исключались все СД, которым соответствовали отрицательные значения весовых коэффициентов.

Несмотря на сложность метода НЗНК, его проще всего адаптировать к потребностям лабораторного НМИС, основанного на интегрирующей сфере и управляемого в среде *LabVIEW*. Однако из-за нелинейной зависимости от тока выходных характеристик СД, которые, к тому же, зависят от временных изменений температуры p - n -перехода СД, реализовать управляемый НМИС, который можно было бы использовать для калибровки, оказалось не так просто, как может показаться, так что к устойчивости метода НЗНК предъявляются определённые требования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bizjak, G., Lindemann, M., Sperling, A., et al.* Tunable LED colour source // *CIE Symp.*, 2010.
2. *Fryc, I., Brown, S.W., Eppeldauer, G.P., et al.* LED-based spectrally tunable source for radiometric, photometric and colorimetric applications // *Opt. Eng.* – 2005. – Vol. 44, No. 11. – P. 111309–111309–8.
3. *Wu, C. C., Hu, N.C., Fong, Y.C., et al.* Optimal pruning for selecting LEDs to synthesize tunable illumination spectra // *Light. Res. Technol.* – 2012. – Vol. 44, No. 4. – P. 484–497.
4. *Luo, M.R., Xu, L., Wang, H.* An LED based spectrum design for surgical lighting // *Proc. 28th CIE Sess.*, 2015.
5. *Lawson, C.L., Hanson, R.J.* 23. Linear least squares with linear inequality constraints. Solving least squares problems // *Society for industrial and applied mathematics*, 1995. P. 158–173.
6. *Tosic, I., Frossard, P.* Dictionary learning // *IEEE Signal Process. Mag.* – 2011. – Vol. 28, No. 2. – P. 27–38.
7. *Chun, S., Kim, J.C., Lee, C.S.* Optimization for spectrally tunable lighting control // *Proc. 28th CIE Sess.*, 2015. P. 2046–2055.
8. *Bro, R., Jong, S.D.* A fast non-negativity-constrained least squares algorithm, // *J. Chemom.* – 1997. – Vol. 11, No. 5. – P. 393–401.
9. *Cantarella, J., Piatek, M.* Tsnnls: A solver for large sparse least squares problems with non-negative variables // *Comput. Res- Repos: CoRR*, 2004.
10. Solve nonnegative least-squares constraints problem – *lsqnonneg*. MATLAB – Maths Works Deutschland, [Online]. Accessible: <http://www.mathworks.com/help/matlab/ref/lsqnonneg.html?requestedDomain=www.mathworks.com>. [Accessed: 2-nov-2015].

11. *Moore, E.H.* On the reciprocal of the general algebraic matrix // *Bulletin of the American Mathematical Society.* – 1920. – Vol. 26, No. 9. – P. 394–395.

12. *Bjerhammar, A.* Application of calculus of matrices to method of least squares; with special references to geodetic calculations // *Trans. Roy. Inst. Tech. Stockholm.* 49. – 1951.

13. *Penrose, R.* A generalized inverse for matrices // *Proc. of the Cambridge Philosophical Society.* – 1955. – Vol. 51. – P. 406–413.



Нина Карли (Nina Carli). Окончила Люблянский университет, после чего стажировалась в Национальном физико-техническом институте, Германия, и в лаборатории освещения и фотометрии электротехнического факультета Люблянского университета

ратории освещения и фотометрии электротехнического факультета Люблянского университета



Армин Сперлинг (Armin Sperling), Ph.D. (1994 г.). Руководитель отделения фотометрии и спектрометрии Национального физико-технического института, Германия. Заместитель

руководителя отделения 2 МКО, председатель Немецкого национального комитета МКО и член экспертного совета комитета по стандартизации в области света Немецкого института стандартов



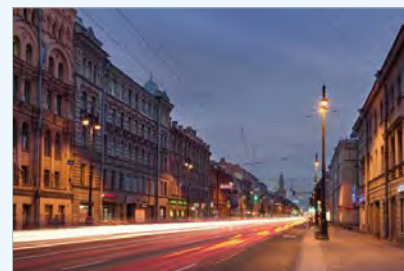
Грега Бизяк (Grega Bizjak), Ph.D. Профессор и руководитель

лаборатории освещения и фотометрии электротехнического факультета Люблянского университета. Вице-президент

Словенского национального комитета МКО и представитель Словении в отделении 2 МКО. Область научных интересов: фотометрия, энергоэффективное внутреннее и наружное освещение, использование естественного света и использование СД для освещения

В Международный день света СПб ГУП «Ленсвет» запустило карту с пешеходными маршрутами

На официальном сайте СПб ГУП «Ленсвет» заработала карта с вечерними пешеходными маршрутами, разработанная с учётом объектов, находящихся в обслуживании этого городского предприятия. Внедрение карты (lensvet.spb.ru/marshruty_progulok_po_vechernemu_pe) приурочено к Международному дню света, отмечаемому второй год подряд 16 мая.



Гостям и жителям города предложено 10 променадов продолжительностью от 30 минут до полутора часов. Пешие прогулки по Центральному, Адмиралтейскому, Петроградскому, Московскому районам знакомят экскурсантов с историческими вехами объектов, концепцией наружного освещения рассматриваемых улиц, скверов и архитектурно-художественного освещения зданий и монументов.

Для того, чтобы отдохнуть, узнать новое и насладиться прекрасными видами, необязательно уезжать далеко. Санкт-Петербург завораживает своей красотой, а особенно великолепной и неотразимой становится северная столица с наступлением ночи. Городское предприятие приглашает жителей и гостей города насладиться достопримечательностями города, совершив вечерние пешеходные прогулки по Петербургу. В каждом из предложенных маршрутов участники смогут найти для себя что-то интересное и познавательное. Ознакомиться с графиком работы наружного и архитектурно-художественного освещения можно по ссылке http://www.lensvet.spb.ru/grafik_2018.

Напомним, что дата 16 мая была провозглашена Международным днём света в 2017 году в Париже в рамках 39-й сессии ЮНЕСКО. Этот день призван подчеркнуть мировое признание той роли, которую свет и освещение играют в жизни человека.

lensvet.spb.ru
16.05.2018