

# Сравнение двух методов реконструкции спектрального распределения коэффициента отражения<sup>1</sup>

Л. ЧЖАН<sup>1</sup>, Б. ЛИ<sup>1,3</sup>, Х. ЧЖАН<sup>2</sup>, И. КАН<sup>1</sup>, В. ЧЖАНЬ<sup>1</sup>, В. И<sup>1</sup>, Ч. ЧЭНЬ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Колледж связи и дизайна Шанхайского научно-технического университета, Шанхай, Китай

<sup>2</sup> Шанхайский исследовательский институт радиотехнического оборудования, Шанхай, Китай

<sup>3</sup> E-mail: 443956507@qq.com

## Аннотация

Спектральные коэффициенты отражения играют важную роль при цветовом отображении объекта. Есть много методов определения спектрального распределения коэффициента отражения (СРКО), два из которых, основанные на динамичном отображении спектра (ДОС) (*agile spectrum imaging*) и на жидкокристаллической модуляции (ЖКМ), сравниваются в данной статье. Для оценки этих методов используются цветовое различие МКО 1931 г., среднеквадратическая погрешность и показатель качества подгонки спектрального распределения (*Spectral Goodness of Fit Coefficient*). Результаты сравнения показали, что метод, основанный на ДОС, лучше метода, основанного на ЖКМ, в части как максимального, среднего и среднеквадратического отклонения цветового различия, так и среднеквадратической погрешности. Более того, в случае метода, основанного на ДОС, средний показатель качества подгонки спектрального распределения равен 0,9967, что на 1,4 % выше, чем в случае метода, основанного на ЖКМ, и достигает эталонного уровня реконструкции спектра. Сравнение этих двух методов будет полезным для дальнейшего исследования реконструкции СРКО и получения многоспектральных изображений при помощи однопиксельных приёмников.

**Ключевые слова:** реконструкция спектрального распределения коэффициента отражения, динамичное отображение спектра, синусоидальная модуляция, жидкокристаллическая модуляция.

## 1. Введение

Цвет объекта зависит, главным образом, от трёх факторов: источни-

ка света, спектрального распределения коэффициента отражения (СРКО) [1] и наблюдателя. Объекты, имеющие разные СРКО, могут иметь один и тот же цвет – это явление называют метамеризмом. Изображения, имеющие одинаковый цвет и разные спектры отражения, в разных условиях могут иметь цветовые различия. СРКО имеет важное значение для точного описания цветовых характеристик объекта. И реконструкция СРКО объектов позволит избежать метамеризма и точно воспроизвести цвет. В настоящее время имеется много методов реконструкции СРКО. Светофильтры [2–3] и фотокамера используются для получения сигнала, который позволяет реконструировать СРКО, но эта система является слишком сложной и дорогостоящей. В [4] модулированное разноспектральное излучение СД источника света используется для облучения клише для цветной краски, что позволяет реконструировать СРКО. Однако модулирование источника света и получение разноспектрального источника света связаны с большими трудностями. Поэтому в последние годы многие исследователи занимались поиском иных способов определения СРКО. В [5] был исследован метод реконструкции СРКО при помощи жидкокристаллической модуляции (ЖКМ). Совместив жидкокристаллический модулятор, однопиксельный приёмник и алгоритм сжатого восприятия, авторы добились высокой точности реконструкции СРКО. В [6] исследовался метод реконструкции СРКО, основанный на модуляции источника света и использовании однопиксельного приёмника и разреженных априорных характеристик (*sparse prior properties*), что привело к упрощению измерительного прибора и уменьшило затраты. В [7] исследовался метод определения СРКО, основанный на использовании динамичного отображения спектра (ДОС) (*agile spectrum*

*imaging*) для получения многоспектрального изображения, преобразуемого при помощи алгоритма корреляции изображения, что обеспечивало реконструкцию СРКО имеющего большой размер изображения.

Все методы определения СРКО имеют свои достоинства и недостатки. Поэтому необходимо выбрать такой метод, который обеспечивал бы точную реконструкцию СРКО. Однако несмотря на разнообразие методов исследования этих методов до сих пор проведено не было. Получение многоспектральных изображений и реконструкция СРКО при помощи однопиксельного приёмника может уменьшить требования, предъявляемые к обладающим высокими разрешением и чувствительностью матричным приёмникам, что позволит также уменьшить стоимость установки и увеличить отношение сигнала к шуму и имеет большие перспективы применения. Так что в этой работе многоспектральные изображения, полученные методами, основанными на ДОС и на ЖКМ, регистрируются однопиксельными приёмниками. Для оценки этих методов реконструкции СРКО используются цветовое различие, среднеквадратическая погрешность и показатель качества подгонки спектрального распределения (*Spectral Goodness of Fit Coefficient*). В статье проведено сравнение точности и надёжности осуществляемой при помощи этих двух методов реконструкции СРКО, что будет полезно при проведении дальнейших исследований получения многоспектральных изображений при помощи однопиксельных приёмников.

## 2. Реконструкция СРКО, основанная на динамичном отображении спектра

Установка для ДОС применяется для модуляции излучения источника света. Затем это модулированное излучение используется для освещения клише для цветной краски, и СРКО может быть реконструировано на основе отражённого сигнала, принимаемого однопиксельным приёмником. На рис. 1 приведена простая схема экспериментальной установки, в которой реализован метод ДОС. Излучение источника света проходит через решётку и модуляционную плёнку

<sup>1</sup> Перевод с англ. Е.И. Розовского

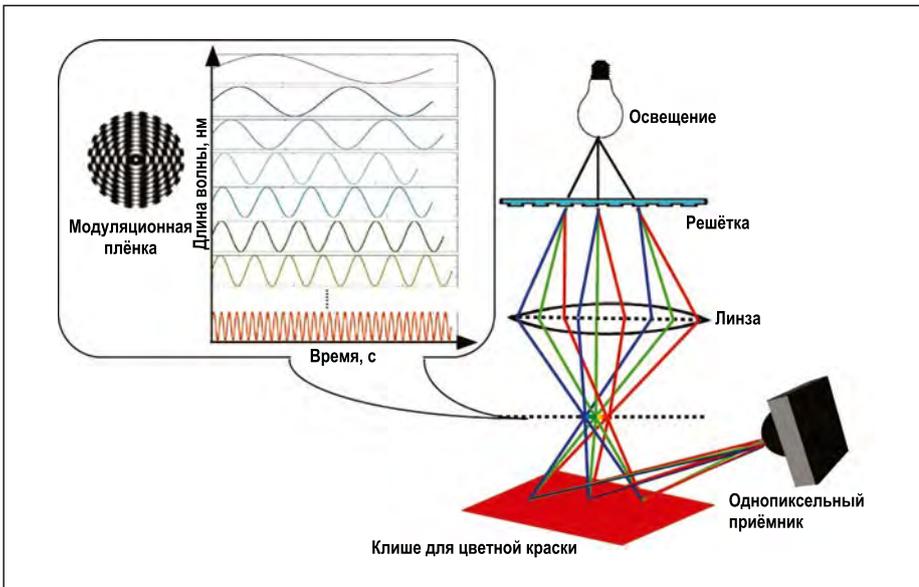


Рис. 1. Схематическое представление метода, основанного на ДОС

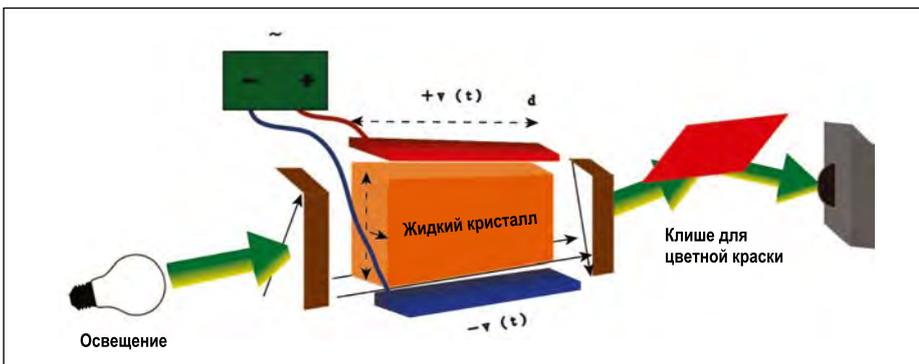


Рис. 2. Схематическое представление метода, основанного на ЖКМ

градиентного типа, а затем попадает на клише для цветной краски. Для регистрации отражённого от клише сигнала используется однопиксельный приёмник. Установка для ДОС состоит из дифракционной решётки и модулирующего вращающегося диска градиентного типа. Вначале излучение источника света проходит через решётку, разделяясь при этом по длинам волн. Будучи сведено при помощи линзы, оно формирует «радужную плоскость» на модуляционной плёнке градиентного типа. Короче говоря, всё излучение, лежащее вблизи определённой длины волны, собирается воедино. Затем при помощи вращающегося диска на участке между центром и краем модуляционной плёнки градиентного типа осуществляется модуляция излучения с разными длинами волн. При вращении коэффициент пропускания плёнки изменяется во времени по синусоидальному закону, в результате чего можно получить матрицу синусоидальной моду-

ляции с временем, отсчитываемым по горизонтали, и коэффициентом пропускания, отсчитываемым по вертикали. После попадания модулированного спектра источника света на клише для цветной краски, отражённый спектральный сигнал поступает на однопиксельный приёмник.

Матрица модуляции формируется решёткой и модулирующим вращающимся диском градиентного типа, которые разлагают спектр на разные длины волн и модулируют излучение источника света. Расчёт матрицы модуляции осуществляется в соответствии с формулой:

$$I_{\lambda_n t_m} = \sum_{n=1}^{T/2} \sin\left(\frac{2\pi n}{T} t\right), \quad (1)$$

где  $I_{\lambda_n t_m}$  – синусоида, соответствующая модулированному излучению с длиной волны  $\lambda_n$ ,  $T$  – период,  $t$  – время,  $n$  – число, обозначающее  $n$ -ую синусои-

дальную функцию (в данной статье  $n = 1, 2, 3, \dots, 31$ ),  $m$  – частота выборки во времени. Матрица модуляции описывается формулой (2), в которой в каждой из строк время остаётся неизменным, а длина волны изменяется, тогда как в каждом из столбцов неизменной остаётся длина волны, а изменяется время. Матрицу  $L_{\lambda_n t_m}$  можно сравнить с транспонированной матрицей  $I$ .

$$L_{\lambda_n t_m} = \begin{bmatrix} I_{\lambda_1 t_1} & I_{\lambda_2 t_1} & \dots & I_{\lambda_n t_1} \\ I_{\lambda_1 t_2} & I_{\lambda_2 t_2} & \dots & I_{\lambda_n t_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{\lambda_1 t_m} & I_{\lambda_2 t_m} & \dots & I_{\lambda_n t_m} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Для реконструкции СРКО используется псевдообратный метод, а способ расчёта описывается формулой:

$$\hat{R} = pinv(S_1 L_{\lambda_n t_m}) \cdot D_1, \quad (3)$$

где  $\hat{R}$  – реконструированное СРКО,  $D_1$  – сигнал отклика, зарегистрированный однопиксельным приёмником,  $S_1$  – спектральное распределение энергии излучения источника света,  $L_{\lambda_n t_m}$  – матрица синусоидальной модуляции, которая была приведена выше, а  $pinv$  – обозначает псевдообратное преобразование матрицы.

### 3. Реконструкция СРКО, основанная на отображении спектра с использованием жидкокристаллической модуляции

Установка для реконструкции СРКО с использованием ЖКМ состоит, главным образом, из жидкокристаллического устройства для обеспечения запаздывания по фазе (*phase retarder*) и однопиксельного приёмника. В этой установке жидкокристаллическое устройство используется для модуляции входного спектрального сигнала. Кроме того, для получения выходного спектрального сигнала используется спектральный приёмник.

Схематическое изображение установки для реконструкции СРКО с использованием ЖКМ приведено на рис. 2. В этой установке входной спектральный сигнал (от источника света), модулированный при помощи жидкокристаллического устройства для обеспечения запаздывания

по фазе, используется для облучения клише для цветной краски, а отражённый сигнал попадает на однопиксельный приёмник. В жидкокристаллическом устройстве для обеспечения запаздывания по фазе имеется прозрачная ячейка, заполненная жидкокристаллическими молекулами, выступающая в роли регулируемой волновой пластинки. Если напряжение не приложено, то ориентация жидкокристаллических молекул определяется ориентирующим слоем. Приложенное к электродам напряжение вызывает двойное лучепреломление, а оптическое запаздывание пропорционально полученному двойному лучепреломлению [5]. Короче говоря, изменяя напряжение, приложенное к ориентирующему слою, может модулировать входной спектральный сигнал. Изменяя амплитуду и частоту напряжения, можно обеспечить разную модуляцию.

Изменение показателя преломления ориентирующего слоя  $\Delta n_i$  под воздействием приложенного напряжения описывается формулой:

$$\Delta n_i = n_i - n_0, \quad (4)$$

где  $n_0$  – показатель преломления обыкновенной волны, а  $n_i$  – показатель преломления необыкновенной волны. Если обозначить как  $d$  соответствующий заданной ячейке зазор, то разность фаз  $\eta_i$  для длины волны  $\lambda$  описывается формулой:

$$\eta_i = (2 \cdot \pi \cdot \Delta n_i \cdot d) / \lambda. \quad (5)$$

При реконструкции СРКО методом, основанным на ДОС, матрицу модуляции преобразуют посредством синусоидального разложения. Однако в случае метода, основанного на ЖКМ, матрица модуляции пропорциональна квадрату синусоидальной функции. Связь между матрицей модуляции  $P_i$  и сдвигом фаз  $\eta_i$  описывается формулой:

$$P_i(\lambda) \propto \sin^2(\eta_i(\lambda) / 2). \quad (6)$$

$$P = \begin{bmatrix} \sin^2\left(\frac{1}{2}\eta_1(\lambda_1)\right) & \dots & \sin^2\left(\frac{1}{2}\eta_1(\lambda_N)\right) \\ \vdots & \sin^2\left(\frac{1}{2}\eta_i(\lambda_j)\right) & \vdots \\ \sin^2\left(\frac{1}{2}\eta_M(\lambda_1)\right) & \dots & \sin^2\left(\frac{1}{2}\eta_M(\lambda_N)\right) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

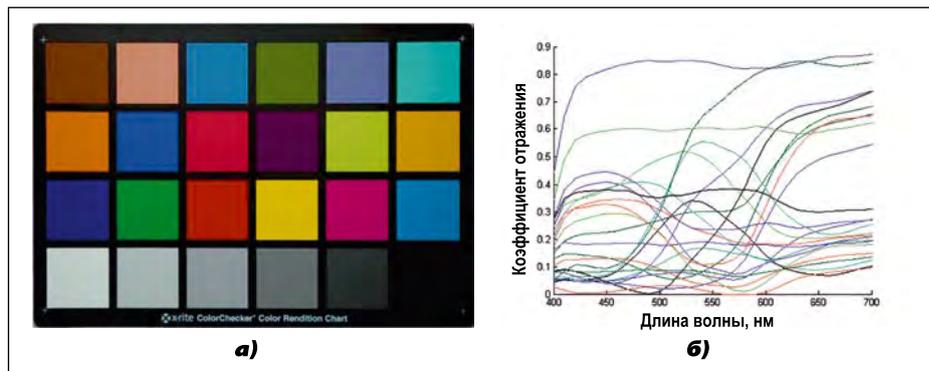


Рис. 3. Карта цветов RC24 (а) и соответствующие СРКО (б)

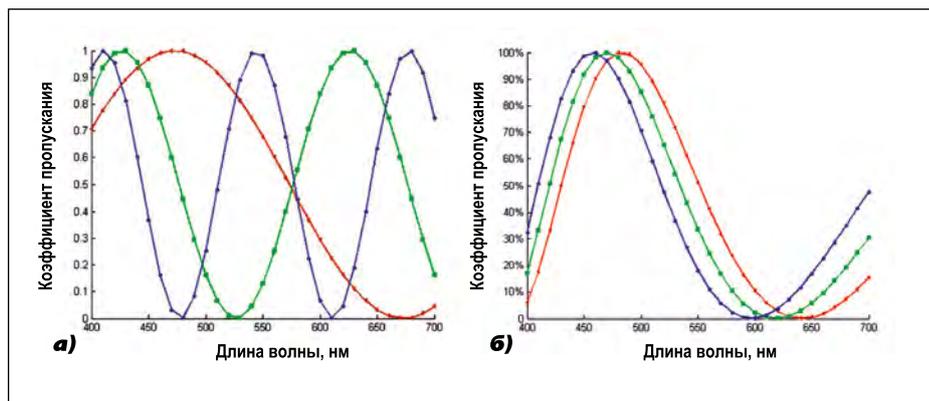


Рис. 4. Матрицы модуляции, соответствующие двум методам; а – метод, основанный на ДОС; б – метод, основанный на ЖКМ

В результате, матрица модуляции  $P$  может быть записана в виде (формула 7):

где  $M$  – количество частот модуляции, а  $N$  – размер выборки.

Реконструкция СРКО производится в соответствии с формулой:

$$\hat{R} = \text{pinv}(S_2 M) \cdot D_2, \quad (8)$$

где  $S_2$  – спектральное распределение энергии излучения источника света,  $M$  – матрица модуляции,  $D_2$  – величина, измеренная однопиксельным приёмником, а  $\text{pinv}$  – обозначает псевдообратное преобразование матрицы.

#### 4. Моделирующий эксперимент

Упомянутые выше два метода реконструкции СРКО были исследованы при помощи моделирующего экспери-

мента. Объект, выбранный для проведения эксперимента, представлял собой 24-цветовую карту цветов *Color Checker RC* компании *GretagMacbech* (далее – RC24). Карта цветов RC24, которая содержит обычные для природы цвета, наиболее широко используется при проведении оптических исследований, представлена на рис. 3(а), а на рис. 3(б) приведены соответствующие СРКО.

Один и те же источник света, излучение которого было модулировано различными способами, приводит к разным результатам. В конце концов, различие между двумя способами модуляции находит своё отражение в матрицах модуляции. В случае метода, основанного на ДОС, матрица модуляции состоит из синусоидальных функций, тогда как в случае метода, основанного на ЖКМ, эта матрица состоит из квадратов синусоидальных функций. Кроме того, не совпадают и формы сигналов, генерируемых с использованием этих разных матриц модуляции (рис. 4, где разные цвета используются исключительно для различения выбранных типичных кривых). В описываемом эксперименте в качестве объекта использовался

видимый свет в диапазоне 400–700 нм с интервалом 10 нм.

На рис. 4(а) и 4(б) приведены спектральные функции модуляции, соответствующие реконструкции СРКО методами, основанными на ДОС и на ЖКМ. Как можно увидеть, периоды трёх представленных на рис. 4(а) кривых синусоидальной модуляции отличаются друг от друга. В то же время, периоды представленных на рис. 4(б) кривых синусоидальной модуляции практически совпадают.

На рис. 5 представлены некоторые результаты реконструкции СРКО применительно к карте цветов *RC24*, полученные с использованием рассматриваемых методов. Рис. 5(а), 5(б), 5(в) и 5(г) содержат, соответственно, результаты реконструкции СРКО четвёртого, восьмого, десятого и четырнадцатого цветов из карты цветов *RC24*. При этом чёрная кривая соответствует истинному СРКО, синяя кривая соответствует СРКО, полученному методом, основанным на ДОС, а красная кривая соответствует СРКО, полученному методом, основанным на ЖКМ.

Из рис. 5 следует, что:

- реконструкция, основанная на ДОС, приводит к гораздо лучшим результатам по сравнению с реконструкцией, основанной на ЖКМ;

- в интервале длин волн 450–700 нм СРКО, реконструированное с использованием ДОС, почти совпадает с истинным СРКО. Сравнение показывает, что результаты реконструкции, основанной на ЖКМ, оказались несколько хуже, демонстрируя большие отклонения от истинного СРКО;

- однако в интервале 400–450 нм результаты реконструкции оказались недостаточно хорошими. Даже в случае метода, основанного на ДОС, который обеспечивает отличную реконструкцию в интервале длин волн 450–700 нм, погрешность реконструкции концентрируется главным образом в интервале 400–450 нм.

## 5. Оценка полученных результатов

Что касается оценки полученных результатов, то в данной работе для сравнения вышеупомянутых методов реконструкции СРКО использовались цветовое различие, среднеквадратическая погрешность и показатель качества подгонки спектрального распре-

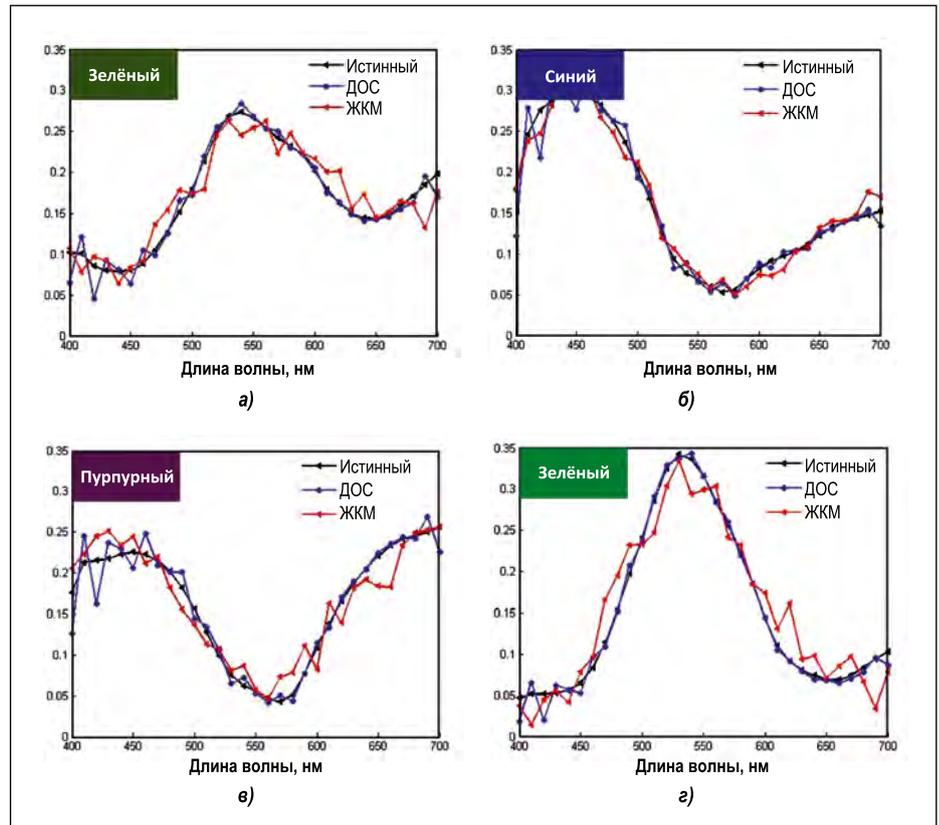


Рис. 5. Примеры реконструкции СРКО, соответствующих разным ячейкам карты цветов *RC24*: а – четвёртая ячейка карты цветов; б – восьмая ячейка карты цветов; в – десятая ячейка карты цветов; г – четырнадцатая ячейка карты цветов

деления. При этом цветовое различие оценивалось применительно к насыщенности цвета, тогда как среднеквадратическая погрешность и показатель качества подгонки спектрального распределения использовались применительно к спектру.

### 5.1. Сравнение цветовых различий

Хорошо известное и повсеместно применяемое цветовое различие [8–11] используется в данной работе для оценки вышеупомянутых методов реконструкции СРКО, причём расчёт цветового различия осуществляется по формуле, соответствующей цветовому пространству МКО 1976 г.:

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}, \quad (9)$$

где  $\Delta E_{ab}^*$  – цветовое различие,  $\Delta L$  – разность яркостей,  $\Delta a > 0$  означает смещение в сторону красного цвета,  $\Delta a < 0$  – смещение в сторону зелёного цвета,  $\Delta b > 0$  – смещение в сторону жёлтого цвета, а  $\Delta b < 0$  – смещение в сторону синего цвета.

Результаты анализа цветовых различий представлены в табл. 1. Сравнение реконструированных СРКО  $\hat{R}$  и истинного СРКО  $\hat{R}$  проводилось применительно к освещению иллюминантами *D50* и *D65* [12] и стандартным источником *A*. Данные, приведённые в табл. 1, позволяют сделать ряд выводов:

- Независимо от источника света, будь то *D50*, *D65* или *A*, как среднее и максимальное, так и среднеквадратическое значения цветового различия оказались наименьшими при использовании ДОС.

- Цветовое различие при сравнении истинного СРКО и СРКО, полученного при использовании ЖКМ, оказалось несколько большим, чем при сравнении истинного СРКО и СРКО, полученного при использовании ДОС.

- Средние значения цветового различия, полученные применительно к обоим методам реконструкции СРКО, меньше, чем 3, что приемлемо.

Цветовые различия, рассчитанные для карты цветов *RC24* применительно к иллюминанту *D50* и обоим методам реконструкции СРКО, приведены

Цветовые различия при освещении разными источниками света

Метод	$\Delta E_{ab}^*$ под D50			$\Delta E_{ab}^*$ под D65			$\Delta E_{ab}^*$ под источником A		
	Макс.	Средн.	Среднеквадр.	Макс.	Средн.	Среднеквадр.	Макс.	Средн.	Среднеквадр.
ДОС	0,7953	0,5326	0,1810	0,8733	0,5991	0,2032	0,6551	0,4236	0,1299
ЖКМ	10,3731	2,9113	2,3140	14,0966	2,9062	2,8605	6,7783	2,8601	1,9055

на рис. 6, на котором синяя гистограмма соответствует цветовым различиям, полученным при осуществлённой с использованием ДОС реконструкции СРКО. Значения этих цветовых различий лежат в пределах от 0 до 0,9, т.е. значительно меньше, чем 3. Оранжевая линия соответствует цветовым различиям, полученным при осуществлённой с использованием ЖКМ реконструкции СРКО. Хотя в этом случае максимальное значение цветового различия и равно 10, его минимальное значение оказалось меньше, чем 1, а из табл. 1 следует, что среднее значение цветового различия равно примерно 2,9.

## 5.2. Сравнение среднеквадратических погрешностей

Для количественного анализа влияния модуляции на реконструкцию СРКО использовалась среднеквадратическая погрешность [13–16]. Реконструированное СРКО близко к истинному, если среднеквадратическая погрешность близка к 0. Расчёт погрешности производится по формуле:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (R - \hat{R})_i^2}{N}}, \quad (10)$$

где  $RMSE$  – среднеквадратическая погрешность,  $R$  – истинное СРКО ячейки карты цветов  $RC24$ ,  $\hat{R}$  – реконструированное тем или иным методом СРКО,  $N$  – размерность представления СРКО, которая в данном моделирующем эксперименте была равна  $N = 31$ .

Средние и максимальные значения среднеквадратической погрешности, а также её среднеквадратическое отклонение, приведены в табл. 2, из которой следует, что в случае ЖКМ значения всех перечисленных величин больше, чем в случае ДОС, и, следовательно, ЖКМ обеспечивает худшую реконструкцию СРКО.

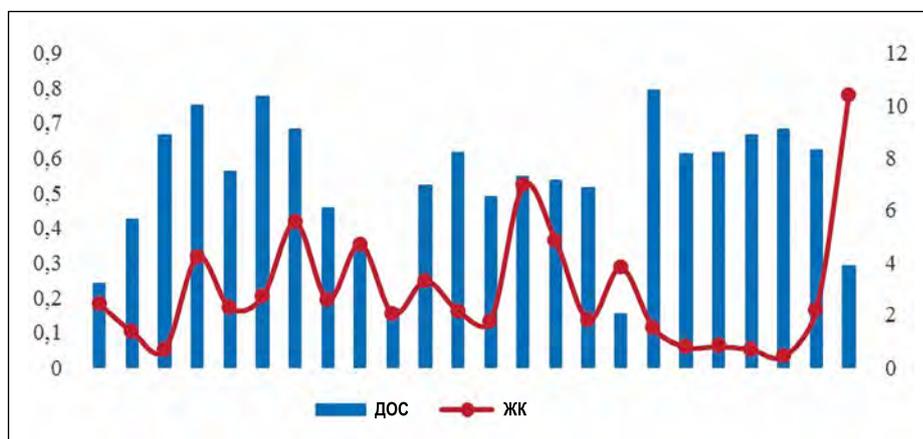


Рис. 6. Цветовые различия для двух методов

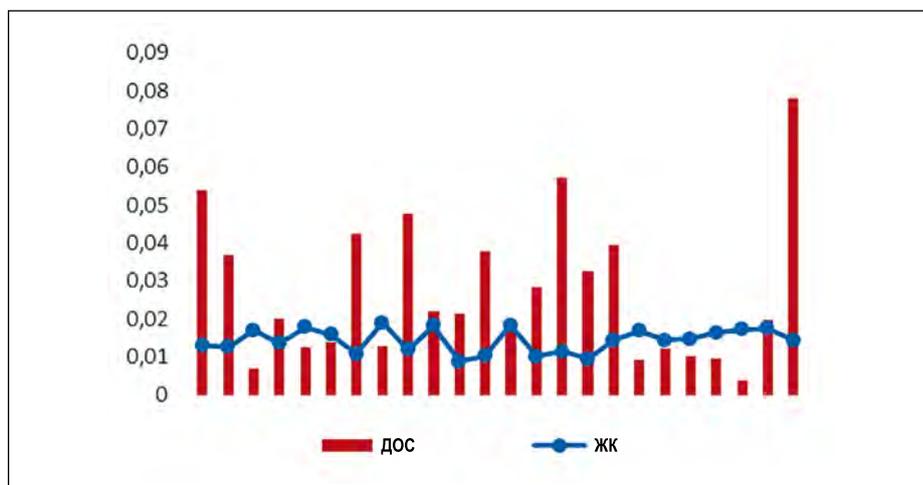


Рис. 7. Среднеквадратические погрешности для двух методов

Среднеквадратические погрешности, рассчитанные применительно к реконструкции СРКО ячеек карты цветов  $RC24$  двумя рассматриваемыми методами, изменяются в пределах от 0 до 0,09 (рис. 7, на котором оранжевая гистограмма соответствует методу, основанному на использовании ЖКМ, а синяя линия – методу, основанному на использовании ДОС). И хотя для некоторых ячеек карты цветов, таких как третья, пятая и с восемнадцатой по двадцать вторую, среднеквадратическая погрешность метода, основанного на использовании ДОС, превышает среднеквадратическую по-

грешность метода, основанного на использовании ЖКМ, в целом среднеквадратическая погрешность реконструкции СРКО ячеек карты цветов  $RC24$  с использованием ДОС является более равномерной и лежит в интервале от 0,01 до 0,02, который уже, чем в случае использования ЖКМ. Так что из табл. 2 и рис. 7 следует, что применительно к среднеквадратической погрешности метод реконструкции СРКО, основанный на ДОС, лучше метода, основанного на ЖКМ.

Причины различия между среднеквадратическими погрешностями, соответствующими двум рассматриваемым

Сравнение двух методов, исходя из среднеквадратической погрешности

Метод	Среднеквадратическая погрешность		
	Макс.	Средн.	Среднеквадр. отклонение
ДОС	0,0142	0,0190	0,0032
ЖКМ	0,0269	0,0782	0,0190

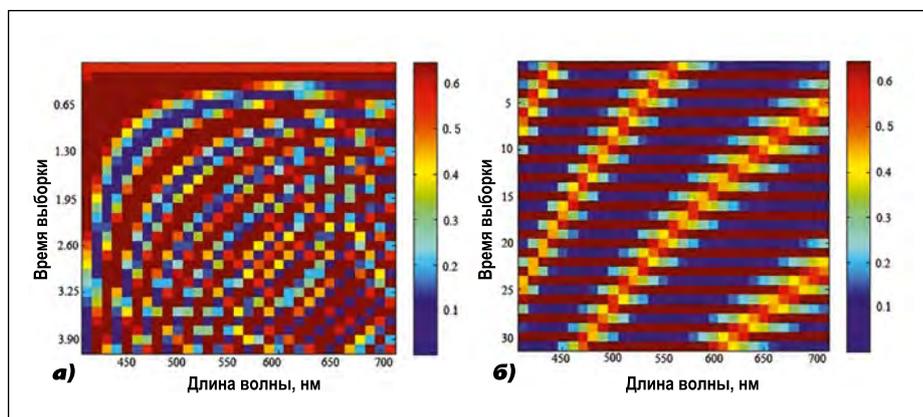


Рис. 8. Матрицы модуляции: а – метод, основанный на ДОС; б – метод, основанный на ЖКМ

мым методам, были проанализированы при помощи матриц модуляции. С точки зрения программного обеспечения, в случае ДОС матрица модуляции является матрицей полного ранга, а в случае ЖКМ – нет. Изображения этих двух матриц модуляции приведены на рис. 8а и 8б соответственно. Различные значения параметров отображены на рис. 8 различными цветами в соответствии с цветными шкалами, приведёнными с правой стороны каждого из рисунков. Различия между двумя матрицами, приведёнными на рис. 8, заметны сразу. Распределение цветов на рис. 8а имеет более сложный характер, что говорит о более случайном распределении образующих матрицу значений. В то же время, на рис. 8б значения в интервале от 0,4 до 0,5 распределены вокруг правого нижнего угла кругообразно, а значения, большие, чем 0,6 и меньшие, чем 0,1, распределены поперечно, причём распределение в целом является более однородным и равномерным, что говорит о менее случайном характере этого распределения.

Численные значения и соответствующие количества случаев появления этих значений в рассматриваемых матрицах модуляции приведены на рис. 9, где по горизонтали отсчитываются численные значения, а по вертикали – то, сколько раз это значение появляется в матрице. Как следует из рис. 9а, в случае метода, основанного на ДОС, количество появлений любых значений лежит в пределах примерно от 80 до 120. В случае метода, основанного на ЖКМ, значения 0,1 и 1 появляются часто, почти 200 раз, а разброс значений охватывает интервал от 40 до 200. При этом из рис. 8 и 9 следует, что в случае метода, основанного на ДОС, матрица модуляции является более неупорядоченной, благодаря чему соответствующая этому методу среднеквадратическая погрешность меньше, чем в случае метода, основанного на ЖКМ.

### 5.3. Сравнение показателей качества подгонки спектрального распределения

Показатель качества подгонки спектрального распределения (*SGFC*) [17] также используется для оценки точности реконструкции СРКО. Чем ближе *SGFC* к 1, тем выше точность реконструкции, а при реконструкции СРКО

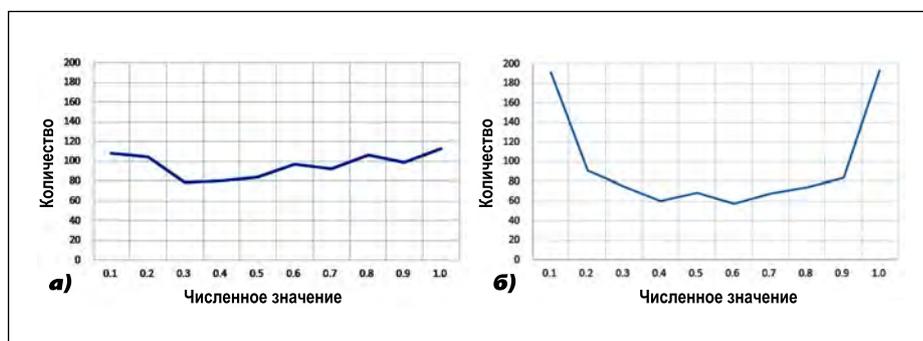


Рис. 9. Количественный состав двух матриц модуляции: а – метод, основанный на ДОС; б – метод, основанный на ЖКМ

значение *SGFC* может достигать 99 %, что считается приемлемым результатом. Если *SGFC* достигает 99,99 %, то реконструкцию можно считать великолепной. Формула для расчёта *SGFC* приведена ниже:

$$SGFC = \frac{\left| \sum_{\lambda} R_{\lambda} \hat{R}_{\lambda} \right|}{\sqrt{\sum_{\lambda} R_{\lambda}^2} \sqrt{\sum_{\lambda} \hat{R}_{\lambda}^2}}, \quad (11)$$

где  $R_{\lambda}$  и  $\hat{R}_{\lambda}$  – истинное и реконструированное СРКО соответственно, а символ  $\sum$  означает сумму всех численных значений.

Максимальные, минимальные и средние значения *SGFC*, рассчитан-

ные применительно к двум рассматриваемым методам реконструкции СРКО, приведены в табл. 3. Из таблицы следует, что в случае метода, основанного на ДОС, среднее и минимальное значения *SGFC* больше, чем полученные в случае метода, основанного на ЖКМ. Однако максимальное значение *SGFC* оказалось несколько большим в случае ЖКМ. Кроме того, в случае метода, основанного на ДОС, и максимальное, и минимальное, и среднее значения *SGFC* превышают 0,99, что удовлетворяет требованию к точности реконструкции. В то же время, в случае метода, основанного на ЖКМ, среднее значение *SGFC* составляет всего лишь примерно 0,98, что удовлетворяет требованию к точности реконструкции, тогда как ми-

Сравнение двух методов, исходя из показателя качества спектральной подгонки

Метод	Показатель качества спектральной подгонки		
	Средн.	Макс.	Мин.
ДОС	0,9967	0,9988	0,9944
ЖКМ	0,9834	0,9998	0,9053

нимальное значение *SGFC* примерно равно 0,9, что говорит о недостаточной хорошей точности этого метода. Так что применительно к *SGFC*, основанный на ДОС метод реконструкции СРКО оказался лучше метода, основанного на ЖКМ.

## 6. Заключение

Реконструкция СРКО в настоящее время широко используется во многих областях, и выбор хорошего способа реконструкции имеет очень большое значение. В данной статье проведено сравнение и анализ методов реконструкции СРКО, основанных на ДОС и ЖКМ. В основу сравнения положены три показателя, а именно, цветовое различие, среднеквадратическая погрешность и показатель качества подгонки спектрального распределения. С точки зрения науки о цветах и красках, цветовое различие является хорошим способом наглядной демонстрации достоинств и недостатков методов реконструкции СРКО, а два других показателя используются для спектральной оценки этих методов. При этом максимальное, среднее и среднеквадратическое отклонения цветового различия меньше в случае метода, основанного на ДОС. Что касается среднеквадратической погрешности, то её максимальное значение и среднеквадратическое отклонение также оказались наименьшими в случае метода, основанного на ДОС. Если говорить о качестве подгонки спектрального распределения, то результат оказывается тем же самым. Таким образом, основанный на ДОС метод реконструкции СРКО лучше метода, основанного на ЖКМ, и может быть рекомендован для широкого применения.

Эта работа финансировалась Китайским национальным фондом исследований в области естественных наук и Шанхайским фондом исследований в области естественных наук

(грант № 61405115), Инновационным проектом шанхайской муниципальной комиссии по образованию (грант № 14YZ099) и Китайской национальной программой фундаментальных научных исследований (грант № 2015CB352004).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barakzahi, M., Amirshahi, S.H., Peyvandi, S., et al. Reconstruction of total radiance spectra of fluorescent samples by means of nonlinear principal component analysis // Journal of the Optical Society of America A. Optics Image Science & Vision. – 2013. – Vol. 30, No. 9. – P. 1862–1870.
2. Kim, B.G., Werner, J.S., Siminovitch, M., et al. Spectral Reflectivity Recovery from Tristimulus Values Using 3D Extrapolation with 3D Interpolation // Journal of the Optical Society of Korea. – 2014. – Vol. 18, No. 5. – P. 507–516.
3. Funamizu, H., Shimoma, S., Yuasa, T., et al. Effects of spatiotemporal averaging processes on the estimation of spectral reflectance in color digital holography using speckle illuminations // Applied Optics. – 2014. – Vol. 53, No. 30. – P. 7072–7080.
4. Lin, M., C., Tien, C.H. Spectral image reconstruction by a tunable LED illumination // Proc. SPIE. – 2013. – Vol. 8870, No. 5. – P. 441–443.
5. August, Y., Stern, A. Compressive sensing spectrometry based on liquid crystal devices // Optics Letter. – 2013. – Vol. 38, No. 23. – P. 4996–4999.
6. Zhang, L., Liang, D., Li, B., et al. Study on the key technology of spectral reflectivity reconstruction based on sparse prior by a single-pixel detector // Photonics Research. – 2016. – Vol. 4, No. 3.
7. Bian, L., Suo, J., Situ, G., et al. Multispectral imaging using a single bucket detector // Physics. – 2015. – No. 6.
8. Zhang, L., Liang, D., Pan, Z., et al. Study on the key technology of reconstruction spectral reflectance based on the algorithm of compressive sensing // Optical & Quantum Electronics. – 2014. – Vol. 47, No. 7. – P. 1–14.
9. Amiri, M.M., Amirshahi, S.H. A hybrid of weighted regression and linear models for extraction of reflectance spectra from CIE XYZ tristimulus values // Optical Review. – 2014. – Vol. 21, No. 6. – P. 818–825.

10. Zhang, L., Liang, D., Li, B., et al. The study of key technology on spectral reflectance reconstruction based on the algorithm of adaptive compressive sensing // Laser Physics. – 2016. – Vol. 26, No. 4. – P. 045201.

11. Shrestha, R., Hardeberg, J.Y., Mansouri, A. One-shot multispectral color imaging with a stereo camera // Digital Photography VII. – 2011. – No. 7876. – P. 298–306.

12. Yuan, W.G., Zhen, L., Qing, Z.J. Spectral color reproduction from CIE tristimulus values using a node address array selection technique // Image Processing and Pattern Recognition. – 2015. – Vol. 8, No. 9. – P. 141–150.

13. Chen, S., Ong, Y.H., Lin, X., et al. Optimization of advanced Wiener estimation methods for Raman reconstruction from narrow-band measurements in the presence of fluorescence background // Biomedical Optics Express. – 2015. – Vol. 6, No. 7. – P. 2633–48.

14. Agahian, F., Funt, B. Outlier modeling for spectral data reduction // Journal of the Optical Society of America A. Optics Image Science & Vision. – 2014. – Vol. 31, No. 7. – P. 1445–1452.

15. Yoo, J. – H., Kyung, W. – J., Ha, H. – G. Estimation of reflectance based on properties of selective spectrum with adaptive Wiener estimation // Proc. SPIE. – 2013. – Vol. 8652, No. 2. – P. 86520–86527.

16. Chen, S., Lin, X., Yuen, C., et al. Recovery of Raman spectra with low signal-to-noise ratio using Wiener estimation // Optics Express. – 2014. – Vol. 22, No. 10. – P. 12102–12114.

17. Gorji, K.S. Representing Spectral Data Using Lab PQR Color Space in Comparison with PCA Method // Prog. Color Colorants Coat. – 2011. – No. 4. – P. 95–106.



**Чжан Лэйхун (Zhang Leihong),**

Др. Доцент  
Шанхайского  
научно-  
технического  
университета.  
Область научных  
интересов:  
алгоритмы

восстановления спектральных  
распределений коэффициентов отражения.



**Ли Бэй (Li Bei),**

аспирант  
Шанхайского  
научно-  
технического  
университета.  
Область научных  
интересов:  
восстановление  
спектральных

распределений коэффициентов отражения  
и однопиксельные приёмники.



**Чжан Хаоцзюнь  
Zhang Haojun,**  
Dr. Старший инженер  
Шанхайского  
исследовательского  
института  
радиотехнического  
оборудования.  
Область научных

интересов: активные лазерные системы  
визуализации и комплексные системы  
обнаружения.



**Кан И (Kang Yi).**  
Окончил Цюйфуский  
государственный  
педагогический  
университет.  
Обучается  
в Шанхайском  
научно-  
техническом  
университете.

Область научных интересов: формирование  
фантомных изображений и сжатое  
восприятие.



**Чжань Вэньцзе  
(Zhan Wenjie),**  
окончил  
Университет  
Чичжоу. Обучается  
в Шанхайском  
научно-  
техническом  
университете.  
Область научных

интересов: формирование фантомных  
изображений и восстановление  
спектральных распределений  
коэффициентов отражения.



**И Вэньцзюань  
(Yi Wenjuan),**  
бакалавр.  
Работает  
в Шанхайском  
научно-  
техническом  
университете.  
Область научных  
интересов:

алгоритмы восстановления спектральных  
распределений коэффициентов отражения.



**Чэнь Чживэнь  
(Chen Zhiwen),**  
бакалавр.  
Работает  
в Шанхайском  
научно-  
техническом  
университете.  
Область научных  
интересов:

полиграфия и восстановление спектральных  
распределений коэффициентов отражения.

## В 2017 г. Philips Lighting сократила выбросы CO<sub>2</sub> на 20 %

Компания *Philips Lighting* в 2017 г. сократила объём своих выбросов углекислоты на 20 % (до 325 кт) и увеличила долю потребления возобновляемой электроэнергии с 67 до 80 %. Это отражает успехи компании в реализации собственной экологической программы «Ярче жизнь – лучше мир», запущенной в 2016 г.

Благодаря этой программе, компания надеется к 2020 г. добиться углеродной нейтральности, потребления только возобновляемой электроэнергии и получения 80 % своей прибыли от реализации экологически безопасных изделий, систем и услуг, что на 3 % выше, чем в 2017 г.

Кроме того, по сравнению с 2016 г. *Philips Lighting* сократила на 26 % количество вывозимых на свалки отходов и продолжает стремиться к экологичности выпускаемой продукции, направляя 83 % своих затрат на НИОКР на работы экологической направленности. Результатом этого явилась серия светодиодных ламп (СДЛ) «TrueForce LED», которая способствует переходу от НЛВД к СД источникам света (до 75 % более энергоэффективным).

С момента своего присоединения к программе «Global Lighting Challenge» («Общепланетарные проблемы освещения»), в 2015 г., и до конца 2017 г. *Philips Lighting* реализовала 1,2 млрд СДЛ (с соответствующими светильниками), предотвратив этим выброс в атмосферу примерно 30 Мт CO<sub>2</sub>. И это лишь часть обязательств компании по данной программе – реализовать к 2020 г. 2 млрд СДЛ.

В 2017 г. за данные усилия *Philips Lighting* названа Лидером сектора электроэлементов и оборудования по версии «Индекса устойчивого развития Доу-Джонса».



ledinside.com  
27.02.2018

## Bilton изготовила полностью герметизированные СД модули

Новые СД модули серии «AIR» компании *Bilton* представляют собой чрезвычайно гибкий силиконовый шланг и обладают степенью защиты IP67, высоким качеством света, эффективным теплоотводом и стойкостью к внешним воздействиям (к УФ излучению, соли, хлору и др.).

### Основные особенности модулей:

- Степень защиты: IP67.
- Гибкость.
- Светят вверх или вбок.
- Длина: до 5 м.
- Удельный световой поток: до 1000 лм/м.
- Напряжение питания: 24 В пост. тока.
- Общий индекс цветопередачи: > 80.
- Коррелированная цветовая температура: 2700, 3200 или 4000 К.



Этим полностью герметизированным ленточным источникам света можно придавать любую форму. Имеются две подсерии: «AIR SIDE» (с излучением вбок) и «AIR TOP» (с излучением вверх). Обе модели имеют три варианта цвета излучения. Модули «AIR» можно изгибать во всех направлениях, что позволяет широко их использовать как во внутреннем, так в наружном освещении.

led-professional.com  
23.02.2018

## Новые технологии «GALAD» и облик прошлых столетий

Продукция МСК «БООС ЛАЙТИНГ ГРУПП» (*BL Group*) была установлена на проспекте 25-Октября в г. Гатчина Ленинградской области. Работа выполнена электромонтажной компанией «РосЭнергоСнаб».

Главная артерия Гатчины приобрела новый изысканный облик, благодаря осветительным комплексам, специально были разработанным проектировщиками этой компании. Осветительный комплекс «Гатчина-2» – это чугунная тумба, двухрожковый кронштейн, два светильника со светодиодами «Факел LED» бренда «GALAD» и стальная опора бренда «OPORA ENGINEERING», которые в сумме подчеркивают неповторимый архитектурный ансамбль. Оборудование было изготовлено на производственных мощностях МСК «БООС ЛАЙТИНГ ГРУПП».

Реконструированный проспект приобрёл абсолютно новые краски и даёт ощущение присутствия в вечерней доброй сказке.



bl-g.ru  
27.02.2018