

Обзор особенностей использования мини-спектрорадиометров с ПЗС-матрицами в прикладной фотометрии

Р.И. СТОЛЯРЕВСКАЯ

Редакция журнала «Светотехника», Москва
ВНИСИ им. С.И. Вавилова, Москва
E-mail: stolya@l-e-journal.com

Аннотация

Статья посвящена особенностям решения задач прикладной фотометрии на основе спектрорадиометрического подхода с использованием современных матричных спектрометров. Спектральное распределение характеристик источника излучения является объективной физической базой определения его световых и цветовых параметров. При этом фотометрические характеристики осветительных приборов и систем освещения рассчитываются на основе регламентированных МКО табулированных спектральных световых эффективностей и ординат кривых сложения цветов. Основная причина смещения акцента в сторону спектральных измерений обусловлена революционным внедрением в системы внутреннего и наружного освещения и светосигнализации светодиодных источников света, имеющих спектры излучения, отличные от спектров традиционных естественных и искусственных источников света. Интегральные методы измерения световых и цветовых характеристик полупроводниковых источников света требуют высочайшего качества коррекции фотометрических каналов (головок) под спектральные эффективности и кривые сложения цветов или учёта поправочного коэффициента коррекции, что, в свою очередь, невозможно без измерения относительных спектральных характеристик излучателей и приёмников излучения.

В статье приведён краткий обзор требований к ПЗС-матричным спектрометрам для их использования в спектрорадиометрических измерениях.

Ключевые слова: спектрорадиометрия, фотометрия, колориметрия, чёрные тела, сферический интегратор, гониоспектрорадиометр, спектральная плотность энергетической освещённости (СПЭО), спектральная плотность

энергетической яркости (СПЭЯ), спектральная плотность потока излучения (СППИ), координаты цвета и цветности, входная оптика, разрешение, полоса пропускания, рассеянный свет, матрица коррекции рассеянного света.

1. Введение

Прикладные задачи фотометрии человечеством решались издревле. Основными инструментами сравнения источников света (ИС) были глаз и затем зрительный фотометр и методика уравнивания яркости в плоскости экрана на основе закона обратных квадратов. В первой половине прошлого века прочные позиции занял селеновый фотоэлемент и люксметр на его основе [1]. К началу 1970-х и, практически, до конца 2010-х лидирующие позиции в световых и цветовых измерениях занимал детекторный подход на основе кремниевых фотодиодов и высококачественных корректирующих светофильтров [2]. Начало 21 века ознаменовалось бурным внедрением светодиодов (СД) во все виды освещения и сигнализации, и, как следствие этого переворота в светотехнике, спектральные методики измерений начали вытеснять интегральные на основе скорректированных фотометров, колориметров и яркомеров с кремниевыми фотодиодами в качестве приёмников излучения (ПИ). Основная причина этого процесса – недостаточное качество коррекции под относительную спектральную световую эффективность и ординаты кривых сложения для измерения световых и цветовых характеристик ИС со спектральным составом, существенно иным, чем у стандартного источника типа *A* (базового источника для калибровки всех видов фотометрических головок), и введение требований по использованию различных (а не только для дневного зрения) функций спектральной световой эф-

фективности [3–8]. При этом основным выбором метода в каждом отдельном случае является оценка погрешности (неопределённости) измерения с учётом используемого оборудования, эталонов и способов калибровки измерительной системы, индивидуальных особенностей измеряемого объекта [9–11].

Анализируя погрешности, заявленные в ходе международных ключевых сличений МКМВ эталонов национальных лабораторий в области детекторной фотометрии, а также спектрорадиометрии [12, 13], можно заключить, что для измерения серых ИС сплошного спектра использование интегральных фотометров весьма успешно (неопределённость может достигать десятых долей процента) и выигрывает по сравнению со спектральным подходом, погрешности которого могут достигать нескольких процентов. Об этом свидетельствуют результаты ключевых международных сличений по спектральной плотности энергетической освещённости (СПЭО) «CCPR –K1, a» и сличений в области световых измерений с применением фотометрических головок [12, 13].

В то же время табулированные МКО функции [14] при спектрорадиометрическом подходе имеют нулевой вклад в методические погрешности (неопределённости) измерений световых или цветовых параметров и расчётов значений зрительных (например, синяя опасная яркость) [15, 16] и незрительных (*ipRGC* реакции на свет) [17, 18] воздействий излучения.

Развитие и широкое внедрение спектрорадиометрического подхода в рутинную фотометрию обязано следующим факторам:

- мощному развитию эталонной базы в области спектрорадиометрии, особенно отечественной, на основе высокотемпературных моделей чёрных тел и методов определения их термодинамической температуры [19];

- разработке и созданию производства миниатюрных спектрометров на основе современной элементной базы оптики, механики и электроники [20–23];

- созданию новых источников излучения (ИИ) с характеристиками, позволяющими их использование в качестве эталонов спектральных характеристик силы излучения, потока излучения, облучённости, энергетической яркости [24, 25].

Количественные индексы оценки МКО качества мини-спектрометров с ПЗС-матрицами

Индекс	Описание индекса
$f_2(\lambda)$	индекс спектрально-направленной характеристики для измерения в режиме освещённости
$f_{2g}(\lambda)$	индекс спектрально-направленной характеристики для измерения в режиме яркости
$f_{2s}(\lambda)$	индекс спектральной симметрии
$f_{2u}(\lambda)$	индекс влияния окружающего поля на спектральную чувствительность
$f_{3.1}(\lambda)$	индекс линейности спектральной чувствительности (фиксированное время интегрирования)
$f_{3.2}(\lambda)$	индекс линейности спектральной чувствительности (фиксированный вход излучения)
$f_{6.T}(\lambda)$	индекс температурной зависимости спектральной чувствительности
$f_8(\varepsilon, \varphi, \lambda)$	спектральный индекс чувствительности к поляризации излучения
$f_9(\lambda)$	спектральный индекс пространственной чувствительности
$f_{12}(\lambda)$	спектральный индекс расстояния фокусировки
$f_{31}(\lambda)$	индекс уширения спектра
$f_{32}(\lambda)$	индекс рассеянного света

Таблица 2

Основные параметры мини-спектрометров с ПЗС-матрицами

№ п/п	Параметр	Назначение параметра
1	Входная оптика	Определяет моду измерения: яркость, освещённость, поток излучения
2	Разрешение	Определяет интервал выборки, оптическое разрешение, полосу пропускания, индекс уширения спектра
3	Рассеянный свет	Один из основных факторов, требующий коррекции в приборе и определяющий одну из наибольших составляющих погрешности измерений
4	Линейность	Параметр, который необходимо знать для фиксированного времени интегрирования при изменяющемся сигнале и для фиксированной интенсивности сигнала при переменном времени интегрирования при оценке результата измерения (погрешности/неопределённости)
5	Калибровка спектрометра	Выбор эталонных источников излучения в зависимости от моды применения (использования) эталона с учётом входной оптики
6	Программный продукт	Программное обеспечение должно учитывать коррекцию рассеянного света, возможность калибровки в заданной моде по соответствующему эталонному источнику излучения, расчёт требуемых параметров по результатам абсолютных или относительных измерений спектра тестируемого светового прибора

Проектируя и создавая ту или иную измерительную систему, нужно очень чётко представлять себе все её узлы, детали и приборы и требования к ним, их калибровке и составляющим погрешности/неопределённости.

2. Общие требования к мини-спектрометрам [26]

Рассматриваемые ниже методические основы спектрометрического подхода в задачах прикладной фотометрии подразумевают, в первую очередь, количественный контроль качества выпускаемых или проектируемых световых приборов и ИИ. Это означает наличие временного фактора выполнения измерительной задачи, которая сегодня успешно решается применением мини-спектрометров с ПЗС-матрицами. Именно этот класс спектрометров и требования к ним будут рассмотрены в данном обзоре на примере наиболее массово зарекомендовавших себя промышленно выпускаемых спектрометрических систем.

Мини-спектрометр с ПЗС-матрицей на выходе представляет собой средство измерения в области спектрометрической для количественного определения на основании измеренного спектрального распределения энергетических, фотонных и световых величин и является универсальным инструментом в области оптической радиометрии.

Применение матричных мини-спектрометров для измерения радиометрических величин в узком спектральном диапазоне длин волн имеет целый ряд требований к их оснащению. В общих чертах в комплект таких спектрометров входят:

- входная оптика, необходимая для проецирования на входную щель дисперсионной системы яркости, освещённости, силы излучения или потока излучения (в соответствии с измеряемой величиной);

- дисперсионный элемент для разделения спектральных составляющих;
- фокусирующая оптика для фокусировки спектральной составляющей излучения в плоскости матрицы детекторов;

- матрица детекторов, размещённая в плоскости фокусирующей оптики;

- документ о прослеживаемой спектрометрической калибровке

Рис. 1. Оптическая схема спектрометра USB4000 фирмы Ocean Optics: 1 – разъем волоконно-оптического кабеля, обеспечивающий позиционирование оптического волокна на входной щели спектрометра; 2 – входная щель; 3 – поглощающий светофильтр для устранения рассеянного света и высших порядков решётки на входе; 4 – зеркальный коллиматор; 5 – дифракционная решётка; 6 – фокусирующее зеркало; 7 – собирающие линзы; 8 – ПЗС-матрица; 9 – переменный светофильтр, отрезающий высшие порядки на выходе; 10 – окно на выходе [22]

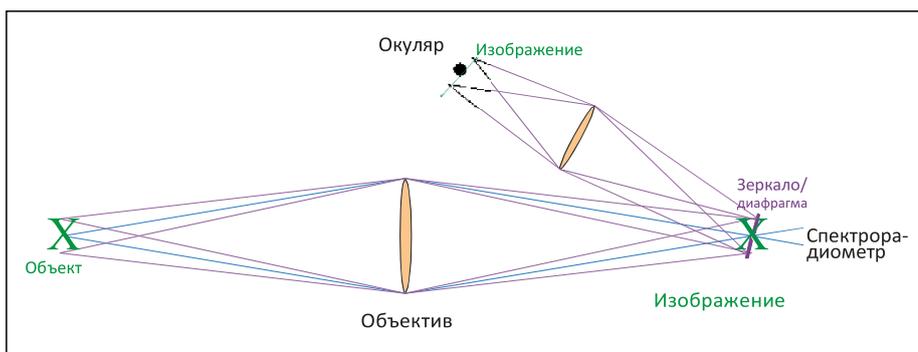
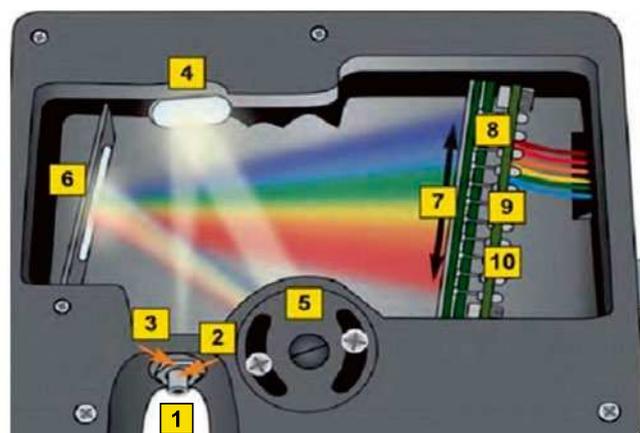


Рис. 2. Схема входной оптики для передачи прямого изображения [24]

ной спектрометрической величины. Существует большое количество мини-спектрометров более или менее точных. Публикация МКО [26] предлагает оценивать их (по примеру фотометров [8]) индексами (табл. 1).

Все показатели (индексы) качества предназначены для ранжирования приборов в зависимости от их исполнения. Индексы не могут использоваться для внесения коррекции, т.е. исправления ошибок, и описывать все приложения и применения спектрометра.

В табл. 2 приведены параметры ПЗС-матричных мини-спектрометров, от которых напрямую зависят результаты их применений

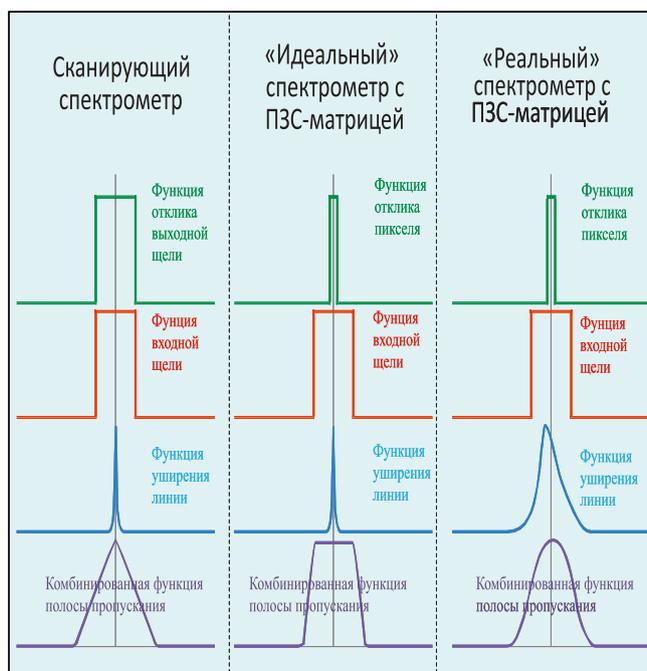
Матричные мини-спектрометры имеют фиксированный (не перемещаемый) дисперсионный элемент, в качестве которого, как правило, используется дифракционная решётка (рис. 1).

2.1. Входная оптика

Измеряемый параметр и схема соответствующей ему измерительной установки определяют входную оптику как аксессуар спектрометра в прикладной задаче.

Калибровка спектрометра и прилагаемый программный продукт должны соответствовать данному аксессуару. В качестве изолированной от внешней среды связи между входной щелью спектрометра и входной оптикой используется волоконный оптический элемент. Обычно это жгуты из оптического волокна малого диаметра, хотя для специальных применений используют и одинарные волоконные световые вводы. Например, одномодовое волокно используется с системами передачи изображения (оптическая система для измерения спектральной плотности энергетической яркости

Рис. 3. Влияние на функцию полосы пропускания компонент спектрометров: сканирующего (левый), идеального матричного (средний), реального матричного (правый) [24]



ке (в соответствии с измеряемой спектральной величиной);

– программный продукт, обеспечивающий возможность внесения и запоминания калибровочного спектра, сравнения с ним результатов измерения тестируемого ИИ, расчёт абсолютных значений спектрального распределения заданной величины для

тестируемого ИИ, расчёт значений радиометрических, фотонных и фотометрических величин, а также параметров фотобиологической опасности зрительного восприятия и реакций незрительного воздействия и фотосинтетической активной радиации на основании измеренного абсолютного спектрального распределения задан-

(СПЭЯ)) на вход спектрометра, что обеспечивает более точное воспроизведение яркостной картинка на входной щели и более высокую пропускную способность входного канала.

С оптическими системами, образующими равномерное распределение освещённости на входной щели спектрометра (измерения в режиме спектральной плотности энергетической освещённости (СПЭО) и спектральной плотности силы излучения (СПСИ), обычно используется мультимодовый волоконный кабель. При этом важно, чтобы пропускание кабеля и параметры входной оптики оставались неизменными минимум в период между калибровкой прибора и его эксплуатацией. Воспроизводимость результатов спектрометрических измерений существенно зависит от качества оптического волокна и конструкции входной оптики.

Для работы в режиме передачи изображения (яркости) на входную щель рекомендуется применять волоконно-оптический жгут большого диаметра, практически это волоконный световод, вход которого оснащён линзовой и/или зеркальной телескопической системой (микроскопом). Три основные схемы такого входа могут быть выполнены по принципам отражённого изображения, прямого изображения и обратной проекции. Схема прямого изображения позволяет переносить изображение объекта на зеркало телескопической системы, которое имеет апертуру для ввода излучения в спектрометр. Эта схема наименее критична и наиболее эффективна, позволяя выполнять прецизионную юстировку изображения объекта на вход спектрометра (рис. 2).

Для работы в режиме измерения освещённости на входе оптоволоконного тракта устанавливается оптика, обеспечивающая равномерное распределение освещённости на входной щели спектрометра. В качестве такой оптики применимы сферы небольшого диаметра или диффузные насадки с характеристиками почти как у рассеивателя Ламберта, т.е. косинусные насадки. Мода измерения спектра по энергетической освещённости, т.е. в режиме СПЭО, позволяет определять и СПСИ, если известно расстояние от ИИ до входной апертуры оптики волоконного тракта и выполняется условие точности ИИ (закон обратных квадратов):

$$I(\lambda) = E_0(\lambda)d^2,$$

где $I(\lambda)$ – СПСИ, $E_0(\lambda)$ – усреднённая СПЭО на входной диафрагме диффузного рассеивателя, d – расстояние между ИИ и входной диафрагмой оптико-волоконного тракта. Кроме того, такой спектрометр с калибровкой по СПЭО может использоваться в качестве приёмного тракта гониометрической установки, имеющей плечо, соизмеримое с d калибровки. Это позволит определять спектральную плотность потока излучения (СППИ) на основе углового распределения $E(\varphi, \theta, \lambda)$ для тестируемого ИИ, а также соответствующие интегральные поток излучения и световой поток и усреднённые координаты цветности светового прибора. Сочетание матричного мини-спектрометра, калиброванного в моде СПЭО, с гониометрической установкой большого радиуса

плеча позволяет решать наибольшее количество задач определения параметров светового прибора [27]. Применение аналогичного спектрометра с входной диффузной насадкой в составе сферического интегратора требует калибровки всей установки по эталонному излучателю СППИ. Такой измерительный стенд позволит определять СППИ тестируемого светового прибора, усреднённые координаты цветности и полный световой поток.

2.2. Разрешение

Рассматривая спектральное разрешение матричного спектрометра, следует понимать, что мы имеем дело со многими составляющими, которые определяют этот параметр в понимании расстояния между двумя пиками спектральных полос, регистрируемого на выходе прибора. В первую очередь эта функция свя-

Рис. 4. Схема матрицы детектора, наглядно демонстрирующая повторную выборку длин волн [26]

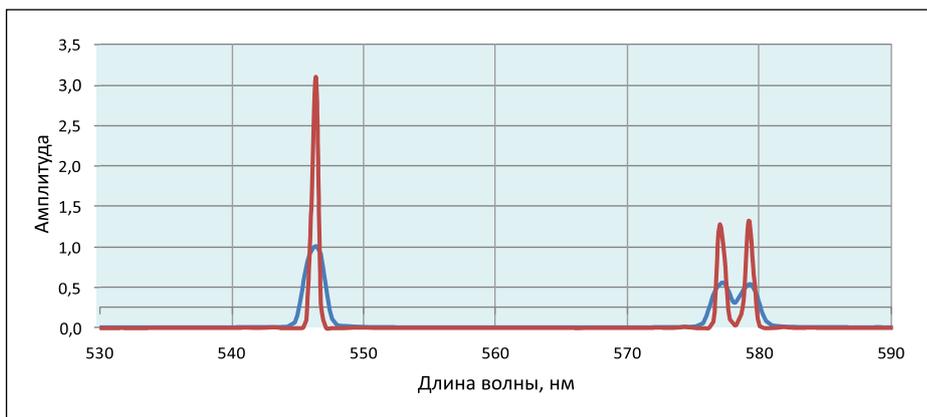
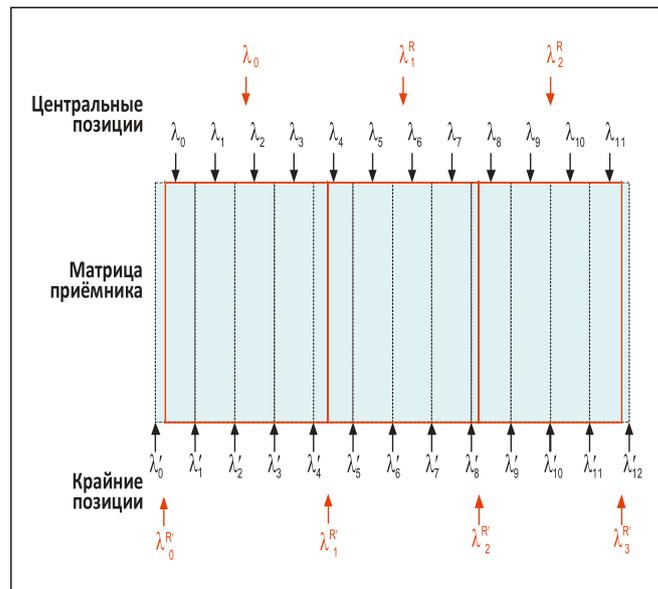


Рис. 5. Пример деконволюции по методу *Richardson-Lucy* для некоторых линий в спектре ртути (синим: измеренный спектр; красным: результат деконволюции) [26]

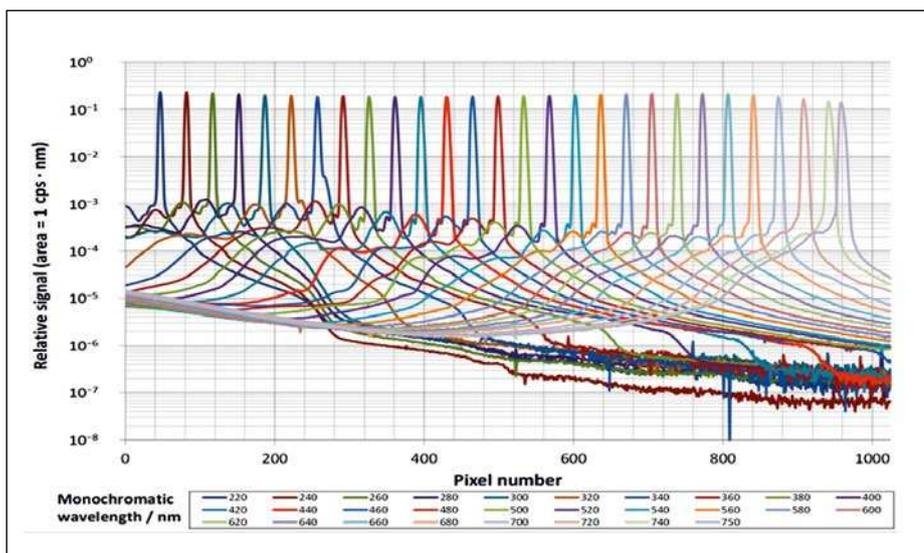


Рис. 6. Пример результата измерений функций уширения линий (СФУЛ) для спектрометра с ПЗС-матрицей [26]. (СФУЛ приведены (нормализованы) к соответствующей им суммарной площади.)

По оси ординат – Относительный сигнал (площадь = 1 отсчёт · нм);

Pixel number – Номер пикселя; Monochromatic wavelength / nm – Монохроматическая длина волны, нм

зана с разрешающей способностью дифракционной решётки и её характеристиками, а также с входной щелью спектрального прибора, количеством пикселей в детекторе и другими не менее важными характеристиками оптической системы прибора. Одна из них – аппаратная функция или **спектральная функция уширения линий (СФУЛ)**, минимизация которой – приоритетная задача при создании прибора. При этом результирующий сигнал измерения представляет собой свёртку (конволюцию) истинного спектра со СФУЛ [20, 26]. Функция **полосы пропускания** – свойство спектрометрической системы, которое описывает относительную чувствительность прибора в зависимости от длины волны при заданном условии входа и выхода излучения (рис. 3).

В матричном спектрометре функция полосы пропускания специфична для конкретных входной щели, решётки, строения детекторов в ПЗС-матрице, положения пикселей в матрице детектора. Для квадратной и трапециевидной функций пропускания ширина полосы соответствует полной ширине на половине максимума сигнала. Входная щель также может вносить вклад в СФУЛ, но у матричного спектрометра нет входной щели, изображение спектра передаётся прямо на матрицу, пиксель которой представляет собой одну из множественных входных щелей. Приборы часто могут

предоставлять данные с фиксированными или переменными интервалами длин волн. В отличие от сканирующих спектрометров с одним детектором, матричные спектрометры требуют особого подхода к установке шкалы длин волн и выполнения повторной выборки в геометрии соответствия шкалы длин волн геометрии пикселей в матрице (рис. 4).

Поскольку матричный детектор находится в плоскости дисперсии спектрометра, каждый пиксель соответствует позиции в шкале длин волн. Разница в длине волны между одним пикселем и следующим есть разрешение в пикселях. Это не то же самое, что оптическое разрешение, которое обычно больше. В спецификациях некоторых производителей не указано, какое «разрешение» приведено, поэтому при сравнении приборов следует соблюдать осторожность.

Пиксели обычно имеют фиксированную физическую ширину. Переменная дисперсия длины волны по пикселям даёт переменное разрешение пикселей и интервалы дискретизации, которые присущи массивным спектрометрам. Однако данные могут быть подвергнуты повторной выборке для эффективного получения эффекта переменной физической ширины и интервала выборки с постоянной длиной волны. По сути, метод суммирует полную интенсивность пикселей плюс пропорциональные

вклады частичных пикселей и назначает их пикселями с повторной выборкой, как показано на рис. 4. Например, в некоторых системах это обычно делается для получения точек измерения с равными интервалами длин волн.

При калибровке по длинам волн, длина волны привязывается к пикселю. В реальности пиксель «видит» некоторый интервал длин волн с различным весом, и общий отклик пикселя, являющийся ФПП – функцией полосы пропускания, проявляется для соответствующей монохроматической линии в некотором диапазоне длин волн, т.е. распространяется на несколько соседних пикселей. Эта функция уширения линии связана с характеристиками дисперсионной системы и aberrациями используемой оптики.

Методам измерения функции полосы пропускания и коррекции спектров, измеренных матричными спектрометрами, посвящено большое количество работ и фундаментальных технических отчётов [20, 26, 27], содержащих списки литературы по данному вопросу. Коррекция влияния полосы пропускания особенно важна при измерениях спектров с крутыми спадами, например спектров излучения СД. Цель коррекции – получение спектра, наиболее близкого к спектру, как-бы измеренному идеальным прибором с очень узким спектральным разрешением. На практике полная деконволюция вряд ли возможна, но в большинстве задач определённая степень снижения уширения полосы пропускания вполне достаточна. Процесс детализации спектрального распределения особенно важен при калибровке спектрометра по шкале длин волн. Он требует, чтобы спектр был измерен минимум в двух точках на ширине полосы. Отклик измерительного прибора на монохроматический ИИ практически является СФУЛ, связанной с оптикой прибора, его полосой пропускания, параметрами детектора (чувствительность и интервал выборки по длинам волн). Отклик прибора на серию монохроматических линий излучения содержит серию СФУЛ с меняющимися интенсивностью и положением и зависящую от выборки по длинам волн [28]. На рис. 5 представлен результат деконволюции части линий в спектре ртути по итерационному методу *Richardson-Lucy* [28].

2.3. Рассеянный свет

Рассеянный свет в матричных спектрометрах – источник серьёзных ошибок измерений, и его оценки и коррекция на стадии разработки прибора и в процессе эксплуатации – необходимое условие получения адекватных результатов измерений. Вопросу рассеянного света посвящено множество работ по оценке и коррекции, разработке методик его устранения и методам количественной оценки.

Наличие рассеянного света означает, что определённые элементы ПЗС-детектора «загрязнены» излучением вне действующего спектрального диапазона прибора. Причины появления этого загрязнения весьма разнообразны, например:

- заводские погрешности в штрихах и шероховатостях дифракционной решётки;
- более высокие порядки дифракции для, например, кремниевых детекторов, имеющих широкую спектральную чувствительность;
- двойная дифракция решётками отражённого света;
- переотражение между детектором и другими оптическими элементами;
- отражение и рассеяние от внутренних поверхностей прибора;
- вход и выход излучения в приборе.

Можно количественно оценивать рассеянный свет измерением спектра широкополосного ИИ с применением светофильтров, полностью отсекающих некоторые длины волн, сигнал на которых можно относить к отклику на рассеянный свет, или измерением в линии монохроматического ИИ (перестраиваемый лазер или двойной монохроматор со «сплошным» ИИ на входе), полагая при этом, что появление отклика на других длинах волн спектрометра является результатом воздействия рассеянного света.

Рассеянный свет может описываться СФУЛ (из-за отклика измерительного тракта на монохроматическое излучение) в спектральном и динамическом диапазонах прибора. То есть отклики будут включать в себя реакции на разные монохроматические ИИ, соответственно, с разным временем интегрирования сигнала. Результаты таких измерений приведены, для примера, на рис. 6.

Рассеянный свет может вызывать отклик в действующем диапазоне длин волн прибора – рассеянный свет ближнего поля (РСБП) – и вызывать реакцию на длинах волн, относительно удалённых от реального диапазона длин волн спектрометра – рассеянный свет дальнего поля (РСДП). На рис. 6 вблизи основного пика видны острые пики, а за ними идут широкие. Такая структура спектров обусловлена переотражением и рассеянием излучения на оптических, электронных и механических элементах прибора.

Рассеянием на элементах прибора (дифракционной решётке, стенках, экранах и зеркалах), как правило, обусловлен именно РСДП. На рис. 6 РСДП соответствуют широкие плавные линии, образованные нижними пределами всех СФУЛ. Вклад РСДП значительно меньше вклада РСБП, но в сумме он может иметь существенное влияние в некоторых применениях, особенно в фотометрии и колориметрии.

Один из наиболее эффективных путей коррекции рассеянного света – экспериментально-расчётный метод определения матрицы коррекции рассеянного света в мини-спектрометре с ПЗС-матрицей. Эту матрицу коррекции можно получить измерением СФУЛ монохроматических ИИ (рис. 6). При этом важно, чтобы излучение монохроматического ИИ вне спектральной линии (полосы) было ничтожным по сравнению с рассеянным светом тестируемого прибора. Лазеры и монохроматические ИИ с применением двойных сканирующих монохроматоров отвечают этим требованиям, но необходимо учитывать поляризацию излучения таких ИИ. Они должны быть деполяризованы, если вход тестируемого спектрометра чувствителен к поляризации. Например, на входе оптоволоконного тракта стоит система передачи изображения. Каждая измеренная СФУЛ на определённой длине волны может использоваться для получения функции распределения рассеянного света на чувствительном двумерном элементе ПЗС-детектора с нормировкой всего суммарного сигнала к сигналу внутри монохромной полосы. Зная функции распределения рассеянного света для некоторых длин волн спектрального диапазона прибора и для каждого двумерного элемента

матрицы ПИ, а также характеристику рассеянного света спектрометра, можно описывать двумерной матрицей функции распределения рассеянного света и выполнять с её помощью коррекцию результатов измерения спектра.

При измерении спектра широкополосного ИИ сигналы от рассеянного света на двумерном элементе матрицы приёмника можно выражать как

$$Y_{SL} = D \times Y_{in\ band},$$

где Y_{SL} – вектор столбца (для n элементов) суммарных сигналов на каждом элементе; D – матрица функции распределения рассеянного света; $Y_{in\ band}$ – вектор столбца полного сигнала от элементов, вносящих свой вклад только в пределах монохромной полосы спектрометра, т.е. это вектор столбца сигнала, скорректированного на сигнал от рассеянного света.

При этом вектор столбца измеренных необработанных сигналов Y_{meas} выражается как

$$Y_{meas} = Y_{in\ band} + D \times Y_{in\ band} = [I + D] \times Y_{in\ band},$$

где I – $n \times n$ единичная матрица; $[I + D]$ – матрица близких тождеств.

Соответственно,

$$Y_{in\ band} = [I + D]^{-1} \times Y_{meas} = C \times Y_{meas},$$

где $C = [I + D]^{-1}$ – матрица коррекции рассеянного света для $n \times n$ элементов матрицы ПИ [26].

3. Заключение

Приведён краткий обзор особенностей применения спектрометрического подхода на основе мини-спектрометров с ПЗС-матрицами.

Спектрометрический подход к определению фотометрических, колориметрических, фотонных и фотосинтетических величин – в определённой степени, основополагающий в решении прикладных задач прецизионного характера. Прогресс в развитии оптоэлектроники позволил спектральным методам измерений распространиться на рутинные тестирования в лабораториях при промышленном выпуске световых приборов разного назначения и испытательных центрах, где объёмы измерений существенно влияют на время их выполнения.

При включении мини-спектро- радиометров в измерительные стенды в основном учитываются:

- комплектация входной оптики волоконно-оптического тракта;
- наличие светофильтров, блокирующих более высокие порядки дифракции на изъянах дифракционной решётки;
- калибровка прибора по длинам волн и интенсивности (СПЭО, СПСИ, СППИ или СПЭЯ) с учётом коррекции рассеянного света во всём спектральном диапазоне прибора;
- тот факт, что использование мини-спектрометра в составе интегрирующей сферы требует новой калибровки установки в целом по эталонному источнику СППИ;
- линейность измерительного тракта в условиях неизменной интенсивности с переменным временем интегрирования;
- линейность измерительного тракта при постоянном времени интегрирования и переменной интенсивности входящего излучения.

Исследованиям вопросов применения современных быстродействующих спектральных приборов посвящены фундаментальные технические отчёты, подготовленные экспертами мирового уровня в рамках технических комитетов Отделения 2 МКО [20, 26, 27].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тиходеев П.М. Световые измерения в светотехнике: (Фотометрия). – Изд. 2-е, перераб. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 464 с.
2. Иванов В.С., Котюк А.Ф., Золотаревский Ю.М., Либерман А.А., Саприцкий В.И., Столяревская Р.И., Улановский М.В., Чупраков В.Ф. Основы оптической радиометрии / Под ред. проф. А.Ф. Котюка. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 544 с.
3. CIE210: 2014 «Photometry Using $V(\lambda)$ -corrected Detectors as Reference and Transfer Standards».
4. CIE018:2019 «The Basis of Physical Photometry», 3rd Ed. – Vienna: CIE.
5. CIE179: 2007 «Methods for Characterising Tristimulus Colorimeters for Measuring the Colour of Light».
6. ISO/CIE19476: 2014 «Characterization of the Performance of Illuminance Meters and Luminance Meters».

7. CIE TN004: 2016 «The Use of Terms and Units in Photometry – Implementation of the CIE System for Mesopic Photometry».

8. CIE TN «Interim Recommendation for Practical Application of the CIE System for Mesopic Photometry in Outdoor Lighting». Enquiry Draft, 2017.

9. CIE198:2011 «Determination of Measurement Uncertainties in Photometry». – Vienna, Austria: CIE.

10. CIE198: 2011 «Determination of Measurement Uncertainties in Photometry – Supplement 1: Modules and Examples for the Determination of Measurement Uncertainties».

11. CIE198-Supplement 2: 2018 «Determination of Measurement Uncertainties in Photometry Supplements 2: Spectral Measurements and Derivative Quantities».

12. Иванов В.С., Котюк А.Ф., Саприцкий В.И., Столяревская Р.И., Хлевной Б.Б. Фотометрия и радиометрия оптического излучения. Книга 4, ч. 3: Эталоны световых и энергетических единиц в области фотометрии и радиометрии некогерентного оптического излучения, глава 17: Методы, средства и результаты международных сличений радиометрических и фотометрических эталонов и шкал. – М.: Полиграф Сервис, 2002. – 215 с.

13. Goodman T., Servantes W., Wooliams E., Sperfeld P., Simionescu M., Blattner P., Kallberg S., Khlevnoy B., Decker P. A Comparison of Spectral Irradiance 250 nm – 2500 nm EURAMET, PR-K1.a., 2009, Final Report (BIPM search: bipm.org).

14. CIE18: 2018 «Colorimetry», 4th Ed.

15. IEC62471: 2006/ CIE S009: 2002 «Photobiological Safety of Lamps and Lamps System».

16. Bartsev A.A., Belyaev R.I., Stolyarevskaya R.I. Methodology of LED Luminance BLH Radiance Measurements // Light & Engineering. – 2013. – No.1. – P. 53–59.

17. CIE S026/E: 2018 «CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light».

18. Van Bommel W. Topics Important for the up-to-date Interior Lighting Professional // Light & Engineering. – 2020. – Vol. 28, No. 1. – P. 4–22.

19. Khlevnoy B., Grigoreva I., Anhalt K., Wähler M., Ivashin E., Otryaskin D., Solodilov M., Sapritsky V. Development of Large Area High Temperature Fixed-Point Blackbodies for Photometry and Radiometry // Metrologia. – 2018. – Vol. 55, No. 2. – P. 43–51.

20. CIE (2014) CIE214:2014 Effect of Instrumental Bandpass Function and Measurement Interval on Spectral Quantities. Vienna: CIE.

21. Gardner J.L. Spectral deconvolution applications in colorimetry // Color Res. Appl. – 2014. – Vol. 39, No. 5. – P. 430–435.

22. USB4000 Fiber Optic Spectrometer Installation and Operation Manual. URL: <http://www.oceaninsight.com/support/documents-manuals/manuals-operating-instras/> (дата обращения: 05.04.2020).

23. Instrument Systems and Konika Minolta Group Products Catalog. URL: http://www.instrumentsystems.com/array_spectrometers/ (дата обращения: 05.04.2020).

24. Gerloff T., Lindemann M., Shirokov S., Taddeo M., Pendsa S., Sperling A. Development of a New High-Power LED Transfer Standard // Light & Engineering. – 2013, No. 2. – P. 41–46.

25. Ivashin E.A., Khlevnoy B.B., Shirokov S.S., Tishenko E.V. Development of New Photometric Standards Based on High Power LEDs // Light & Engineering. – 2018. – Vol. 26, No.1. – P. 58–62.

26. CIE233:2019 «Calibration, Characterization and Use of Array Spectroradiometers».

27. CIE239:2020 «Goniospectroradiometry of Optical Radiation Sources».

28. Cordero R.R., Seckmeyer G., Eichstädt S., Schmähling F., Wübbeler G., Anhalt K., Bünger I., Krüger U., Elster C. Comparison of the Richardson-Lucy method and a classical approach for spectroradiometer bandpass correction // Metrologia. – 2013. – Vol. 50. – P. 107–118. DOI: 10.1088/0026-1394/50/2/107.



Столяревская Раиса Иосифовна, доктор техн. наук. Окончила в 1968 г. физический факультет Казанского государственного университета. В 1976–2002 гг. работала во ВНИИО-

ФИ в лаборатории фотометрии. Зам. главного редактора и научный редактор английской версии журнала «Светотехника / Light & Engineering». Представитель Российского национального комитета МКО в Отделении 2 МКО (с 1999 г.)