

УДК 535.241

© Э. В. Кувалдин

## ВЫБОР И ОПТИМИЗАЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ СПЕКТРОФОТОМЕТРА КОЭФФИЦИЕНТОВ ДИФФУЗНОГО ОТРАЖЕНИЯ (ЧАСТЬ 1)

Описываемый метод оптимизации состоит из двух частей. Первая часть посвящена выбору оптической схемы с минимальными потерями, вторая содержит методы оптимизации приемного тракта, регистрирующей электрической схемы и минимизации погрешности измерений. Обсуждаются основные трудности и возможности их преодоления.

### ВВЕДЕНИЕ

Существует довольно много фотометрических задач, решаемых фильтровыми фотометрами. В последнее время фильтровые фотометры заменяются спектрофотометрами в связи с тем, что изготовление большого числа светофильтров экономически не оправдано. К этим спектрофотометрам не предъявляется требование высокого спектрального разрешения. Поскольку большинство из них работает в приборах для измерения коэффициентов диффузного отражения, в которых имеются большие потери потока излучения в оптической схеме прибора, то в связи с этим требуются большой геометрический фактор спектрального прибора, минимальные потери в фотометрической схеме измерения и максимальное отношение сигнала к шуму в схеме регистрации.

### ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Рассмотрение в статье ведется применительно к приборам дешевым и малогабаритным с точки зрения разработчика прибора, учитывающего требования потребителя. С точки зрения потребителя имеются два основных технических параметра: пределы измерения и погрешность измерения. Остальные либо характеризуют степень выполнения прибором нужных для решения задачи функций, либо дают только эксплуатационные характеристики, такие как габариты, масса, энергопотребление, удобство эксплуатации, время измерения и производительность. С точки зрения разработчика прибора первые два показателя сводятся к одному — линейному динамическому диапазону прибора.

Другие важные показатели — это решаемая фотометрическая задача, ее метрологическое обеспечение, энергетический КПД прибора, размер измеряемых образцов и габариты прибора. Последние

два параметра, как правило, задают геометрический фактор оптической схемы прибора.

### ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ СХЕМЫ СПЕКТРОФОТОМЕТРА

Проектирование прибора начинается с решения поставленной перед разработчиком фотометрической задачи, определяемой назначением прибора. Это — измерение той или иной фотометрической величины, коэффициентов пропускания, направленного, диффузного и смешанного коэффициентов отражения, коэффициентов рассеяния. Все эти параметры в спектрофотометре измеряются как функции длины волны, а иногда и времени. Если последнее требование не предъявляется, то измерению подлежат интегральные по времени фотометрические величины, так как в линейных импульсных измерительных системах оптимальным источником будет  $\delta$ -импульс излучения, т.е. импульс произвольной формы с длительностью, меньшей постоянной времени интегрирования в измерительной системе. В общем случае энергия излучения, попадающая на приемник излучения, определяется выражением

$$Q = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial Q}{\partial \lambda} \tau_{\lambda 0} \rho_{\lambda} \omega \frac{\beta}{\pi} S d\lambda,$$

где  $\partial Q/\partial \lambda$  — спектральная плотность энергии излучения источника;  $\tau_{\lambda 0}$  — спектральный коэффициент пропускания оптической системы;  $\rho_{\lambda}$  — спектральный коэффициент отражения (пропускания, рассеяния) образца (для энергетических расчетов  $\rho_{\lambda} = 1$ );  $\omega$  — телесный угол, в котором излучение от источника попадает в оптическую систему прибора, для сложной оптической системы — минимальный телесный угол, определяемый

геометрическим фактором элементов системы (осветителя, монохроматора и т. д.);  $S$  — площадь тела свечения источника, излучение из которого попадает в оптическую систему;  $\beta$  — угол наблюдения, в сложной системе — как и для  $\omega$ ;  $\lambda_1, \lambda_2$  — спектральный интервал измерения [1].

Для энергетического расчета энергия в выбранном спектральном интервале, попадающая на приемник излучения,

$$Q(\lambda) = B_Q(\lambda)\omega\tau_o(\lambda)\frac{\beta}{\pi}$$

зависит от параметров источника и эффективности оптической системы, определяемой углами  $\omega, \beta$  и пропусканием  $\tau_o$ . Приемник излучения характеризуется для падающей энергии интегральной по времени чувствительностью  $S_{\text{инт}}(\lambda)$  (В/Дж), которая для фотоэлектрических приемников излучения определяется как  $S_{\text{инт}}(\lambda) = S(\lambda)/C$ , где  $S(\lambda)$  — спектральная чувствительность приемника (А/Вт),  $C$  — емкость фотоприемника вместе с паразитными емкостями схемы включения (Ф).

Полученное на выходе фотоприемного устройства напряжение сигнала дополнительно усиливается, фильтруется и поступает в электронную измерительную систему, как правило на вход аналого-цифрового преобразователя. Таким образом, получается обобщенная структурная схема спектрофотометра, состоящая:

— из источника излучения, характеризуемого спектральной плотностью энергии излучения и площадью тела свечения;

— оптической системы, включающей измеряемый образец, предназначенной для решения поставленной фотометрической задачи и характеризуемой методом спектрального разложения, геометрическим фактором и потерями энергии; последние делятся на неизбежные, связанные с принципом измерения, и дополнительные, связанные с несовершенством схемы и входящих в нее элементов;

— фотоприемного устройства соответствующего спектрального диапазона, характеризуемого чувствительностью и пороговой энергией;

— электронной измерительной системы, преобразующей сигнал фотоприемного устройства в удобный вид для представления информации.

В зависимости от вида выбранного спектрального разложения модуляция и демодуляция сигнала может происходить в различных элементах структурной схемы. В хорошо сконструированном спектрофотометре размер пятна излучения на образце вместе с геометрическим фактором оптической системы определяет габариты прибора. С точки зрения энергетического расчета каждый элемент структурной схемы характеризуется потерями сигнала, поэтому на первом этапе проектиро-

вания необходимо свести эти потери к минимуму и затем на втором этапе оптимизировать измерительную систему по критерию достижения минимальной погрешности измерения с учетом дополнительных требований технического задания. Рассмотрим с этих позиций составляющие структурной схемы спектрофотометра.

## ИСТОЧНИК ИЗЛУЧЕНИЯ

Источник излучения характеризуется спектральной плотностью энергии и размером тела свечения. Дополнительные параметры: длительность импульса излучения или закон модуляции, энергетический КПД, индикатриса излучения, габаритные размеры источника питания и т.д. При близких значениях основных параметров предпочтение отдается источнику с максимальным энергетическим КПД в выбранной области спектра.

## ОПТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ

Оптические схемы спектрофотометров, решающие поставленную фотометрическую задачу, отличаются по принципу кодирования. Сравним различные схемы спектральных приборов преимущественно с точки зрения максимальной энергетической эффективности, а не с точки зрения получения максимального спектрального разрешения, которое обычно в рассматриваемых приборах высоким не требуется. В классическом монохроматоре, использующем призму или дифракционную решетку, пространственное кодирование и декодирование производится решеткой или призмой и выходной щелью. С конца 50-х годов появились приборы с кодированием и декодированием во внутреннем сечении оптического прибора, когда площадь декодирующего элемента во много раз превышает площадь выходной щели монохроматора. К ним относятся растровые монохроматоры, сесам, спектрометры с преобразованием Адамара и Фурье-спектрометры. Подробное рассмотрение принципа действия и основных характеристик этих приборов приведено в книге [1]. В ней показано, что спектральное разрешение приборов нового типа может быть получено на два порядка больше, чем у классического монохроматора. В конце книги ее автор отмечает, что на практике наиболее распространены простые монохроматоры с дифракционными решетками, и делает вполне справедливый вывод о том, что причина несоответствия выводов теории с практическим применением заключается в ограниченности используемых критериев. К таким критериям, как нам кажется, нужно отнести по крайней мере еще два: потери энергии внутри спектрального прибора и линейный динамический диа-

пазон оптического прибора, определяемый отношением наибольшего сигнала в получаемом спектре к сумме различного рода неинформативных сигналов, таких как рассеянный свет, наложение высших порядков дифракции и т.д. Кроме этого, необходимо также учитывать наибольший размер приемника, измеряемого образца или тела свечения источника излучения и габарит оптической системы, определяющие геометрический фактор спектрального прибора. Стремление максимально увеличить геометрический фактор всего прибора от источника до приемника (а с ним и сигнал) во всех типах приборов приводит к увеличению aberrаций и уменьшению спектрального разрешения.

Следует отметить, что приборы с декодированием в наибольшем сечении оптической схемы превосходят на два порядка классический монохроматор в спектральном разрешении (эта характеристика подобна тому, как отношение диаметра пучка излучения лазера к длине волны определяет расходимость пучка или отношение площади раскрытия антенны к длине волны определяет ширину ее диаграммы направленности). При этом динамический диапазон прибора (контраст кодированной картины) у них значительно меньше, чем в приборах с декодированием выходной щелью, что объясняется хорошим пространственным разделением информативной и неинформативной составляющих в классических приборах.

В интерференционных приборах (Фурье-спектрометр, сесам) и приборах с масками получить больший по сравнению с классическими приборами геометрический фактор (в предельном случае, а не в случае равного спектрального разрешения) не удастся из-за aberrаций в оптической системе (исчезает так называемый выигрыш Жакино для Фурье-спектрофотометра). Что касается эффективности, которая в них определяется долей информативной компоненты (например, отношением энергии интерферограммы к общей энергии, попадающей на приемник излучения в Фурье-спектрометре), то она того же порядка или даже несколько меньше, чем у лучших монохроматоров с дифракционными решетками. Приборы с декодированием масками имеют дополнительные потери на пропускание оптической схемы и по этой причине уступают Фурье-спектрометру и сесаму при близком спектральном разрешении. Среди двух последних Фурье-спектрофотометр выгодно отличается широким спектральным диапазоном и лучшим отношением сигнала к шуму; кроме того, в настоящее время с развитием вычислительной техники устранен основной недостаток Фурье-спектрометра — сложность вычислений спектра.

С точки зрения энергетического расчета все рассматриваемые типы спектральных приборов по эффективности близки друг к другу. Потери энергии в них, определяемые геометрическим факто-

ром и спектральным коэффициентом пропускания оптических элементов, — величины одного порядка. Здесь даже преимущество могут иметь приборы с дифракционными решетками и призмами.

Примерно аналогичная классификация приведена в книге [2]. Поэтому при выборе типа спектрального прибора целесообразно рассматривать только два варианта: монохроматор с призмой или решеткой и Фурье-спектрофотометр. Таким образом, учитывая поставленную фотометрическую задачу, можно сделать следующие выводы по оптимальному выбору оптической схемы спектрофотометра:

1. В любой области спектра, где используются тепловые приемники излучения или приемники с малой спектральной чувствительностью, Фурье-спектрометр будет иметь преимущества перед классическими спектрофотометрами по причине большей чувствительности за счет надпорогового переноса информации.

2. В УВИ-области спектра, где имеются токовые приемники излучения с большим квантовым выходом различают два случая:

- в случае когда не требуется большое число интервалов спектрального разрешения, предпочтение по перечисленным выше факторам следует отдать классическому прибору с призмой или дифракционной решеткой, имеющим больший динамический диапазон (контраст);

- в случае большого числа точек спектрального разрешения и широкого спектрального диапазона Фурье-спектрофотометр будет в во многих случаях более простым и надежным, так как он пригоден в любой области спектра в отличие от призмы и в нем не требуется дополнительных элементов для разделения высших порядков дифракции в отличие от дифракционной решетки.

Как видно из изложенного, с точки зрения потерь сигнала в оптической схеме обе группы спектральных приборов примерно совпадают. За счет чего же при равном спектральном разрешении получается энергетический выигрыш в ИК-области спектра в Фурье-спектрофотометре по сравнению с классическим прибором с решеткой или призмой? Оказывается, из-за дополнительных потерь в фотоприемном устройстве, которое в ИК-области спектра имеет чувствительность на несколько порядков меньшую, чем квантовые приемники УВИ-области спектра, и эта составляющая общей погрешности существенно превосходит остальные. В Фурье-спектрофотометре на приемник излучения попадает весь поток, определяемый геометрическим фактором прибора, в приборах с решеткой — его небольшая часть, которая определяется отношением полуширины выделяемого спектрального интервала ко всей области спектра, исполь-

зуемой в приборе. Поэтому в ряде случаев эта часть оказывается меньше пороговой энергии приемника излучения и не может быть зарегистрирована. Существенно большей энергии сигнал в интерференционном приборе превосходит пороговую энергию приемного устройства и воспроизведенный сигнал содержит всю информацию о спектре, т.е. декодирование в Фурье-спектрофотометре производится после приемника излучения с пороговой энергией  $W_{п}$ . Если бы не было дополнительных потерь, образующих порог чувствительности приемного устройства, то с точки зрения линейной системы преобразования все равно в какой ее части производить декодирование: до приемника или после него. При наличии порога система обработки сигнала становится нелинейной и ее возможности реализуются только при превышении сигнала над порогом. Поэтому в УВИ-области спектра, где отсутствует порог (квантовый выход фотоприемного устройства близок к единице), энергетические преимущества (выигрыш Фелжета) исчезают и остаются только рассмотренные выше соотношения. Конечно, это грубая, но наглядная модель, на самом деле нужно рассматривать случайную составляющую погреш-

ности измерения в обоих случаях, и резкой пороговой границы в этом случае не будет, но физический принцип от этого не изменится. Математически отсутствие выигрыша Фелжета в УВИ-области спектра показано еще в 1972 г. в книге [2]. Выбору конкретной схемы и ее расчету посвящено много статей и монографий, например [3].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Толмачев Ю.А.* Новые спектральные приборы: Принципы работы. Л.: Изд. Лен. Университета, 1976. 128 с.
2. *Белл Р.Дж.* Введение в Фурье-спектроскопию. М.: Мир, 1975. 380 с.
3. *Пейсахсон И.В.* Оптика спектральных приборов Л.: Машиностроение, 1970. 271 с.

*ВНЦ ГОИ им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург*

Материал поступил в редакцию 26.01.2001.

## SELECTION AND OPTIMIZATION OF THE SPECTROPHOTOMETER STRUCTURAL SCHEME FOR DIFFUSE REFLECTANCE MEASUREMENTS (PART 1)

**E. V. Kuvaldin**

*Vavilov State Optical Institute, Saint-Petersburg*

The described method of optimization consists of two parts. The first part is devoted to selection of the optical schematic providing minimal losses, the second one presents the methods for optimization of the receiving path, electric measuring circuit and also for minimization of measurement error. The main problems and the ways of their solving are discussed.