

УДК 535.241

© Э. В. Кувалдин

ВЫБОР И ОПТИМИЗАЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ СПЕКТРОФОТОМЕТРА КОЭФФИЦИЕНТОВ ДИФФУЗНОГО ОТРАЖЕНИЯ (ЧАСТЬ 2)

Описываемый метод оптимизации состоит из двух частей. Первая часть [1] была 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.

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИЕМНИК ИЗЛУЧЕНИЯ

Фотоэлектрический приемник излучения в непрерывном режиме работы характеризуется в основном двумя параметрами: спектральной чувствительностью $S(\lambda)$ в спектральном интервале λ_1 – λ_2 (или S_λ на длине волны λ) и темновым током I_T . Инерционные свойства приемника либо вообще не оценивают, либо оценивают полосой частот частотной характеристики. В настоящее время приемники все чаще работают совместно с вычислительной техникой и аналого-цифровыми преобразователями, которые измеряют выходное напряжение на нагрузке приемника излучения только в некоторый конкретный момент времени выборки, и все остальное время значения этого напряжения для системы регистрации не имеет значения, т.е. измерительная система работает по существу в импульсном режиме. Для определения основных характеристик фотоэлектрического приемника излучения и фотоприемного устройства на его основе в импульсном и непрерывном режимах его работы можно воспользоваться интегральными во времени параметрами: энергией излучения и интегральной по времени чувствительностью фотоприемника (ГОСТ 24286–88), которая определяется как отношение интеграла по времени от напряжения (тока) на выходе фотоприемного устройства к падающей энергии излучения.

Для приемников излучения, эквивалентная схема замещения которых может быть представлена в виде источника тока (вакуумный фотоэлемент, ФЭУ, пироприемник, фотодиод, фоторезистор), интегральная по времени чувствительность представляется (1):

$$S_{\text{ин}} = S_\lambda / C. \quad (1)$$

Здесь S_λ — чувствительность в А/Вт в непрерыв-

ном режиме излучения на длине волны излучения λ или в спектральном интервале (в этом же интервале рассматривается и $S_{\text{ин}}$, но индекс λ для краткости опущен); C — емкость приемника излучения. Подставляя это значение в формулу (1), получаем связь между падающей энергией и выходным сигналом

$$W = U_c C / S_\lambda. \quad (2)$$

Считаем, что пороговая энергия $W_{\text{п}}$ — это энергия, соответствующая сигналу, равному напряжению шума на конденсаторе C . Для простоты рассуждения считаем, что шумы фотоприемника имеют только тепловой характер, что справедливо для всех вышеперечисленных приемников излучения, кроме фотоумножителей. Для фотоумножителей можно внести соответствующие поправки [2]. Напряжение шумов $U_{\text{ш}}$ на сопротивлении нагрузки $R_{\text{н}}$, параллельном конденсатору C , в полосе частот Δf для предусилителя с коэффициентом усиления N по формуле Найквиста равно

$$U_{\text{ш}}^2 = 4kT \cdot \Delta f R_{\text{н}} N. \quad (3)$$

Коэффициент усиления $N = 3$ – 4 довольно легко может быть получен в предусилителе с использованием современной элементной базы [3, 4]. Большинство схем включения фотоприемников содержит фильтры первого порядка, в основном RC фильтры, где R — сопротивление нагрузки фотоприемника. Это может быть резистор нагрузки в цепи фотоприемника, в цепи обратной связи операционного усилителя, либо эквивалентное сопротивление, определяемое указанными выше сопротивлениями, темновым током фотоприемника и током утечки первого каскада предусилителя. Поскольку напряжение сигнала в фотоэлектрическом приемном устройстве пропорционально $R_{\text{н}}$, а напряжение шумов, как видно из формулы (3), —

$R_n^{0.5}$, то чем больше R_n , тем больше отношение сигнала к шуму. Реальным ограничением будут темновой ток и ток утечки, а также емкость C , определяющая вместе с R постоянную времени нарастания и спада сигнала. Емкость C также равна сумме емкостей фотоприемника, входной емкости предварительного усилителя и емкости монтажа. В случае регистрации коротких импульсов излучения реальной нагрузкой фотоприемника будет именно емкость C . По мере увеличения длительности импульса излучения начинает работать сопротивление нагрузки, и для очень длинных импульсов или непрерывного режима реальной нагрузкой будет резистор R_n .

Как видно из сказанного, в хорошо сконструированном фотоприемном устройстве с максимальным отношением сигнала к шуму одни и те же элементы схемы включения определяют как напряжение сигнала в момент измерения, так и шумовую полосу частот Δf . Для фотоэлектрических и в большинстве случаев применения пирозлектрических приемников излучения постоянная времени RC обычно существенно превышает инерционность самого приемника и соответствующая ей полоса частот равна $\Delta f = 1/2\pi RC$, шумовая же полоса частот $\Delta f_{ш}$, входящая в формулу (3), равна $\Delta f_{ш} = 1.59\Delta f$ с учетом того, что Δf определяется на уровне -3 дБ от максимального сигнала, а $\Delta f_{ш}$ при затухании -6 дБ на октаву. Тогда $\Delta f_{ш} = 0.253/RC$. Подставляя эти значения в формулу (3), получаем

$$U_{ш}^2 = 4kTN \cdot 0.253/C. \quad (4)$$

Подставляя также $N = 4$ и значение температуры для нормальных условий работы прибора (20°C), получаем, что

$$U_{ш} = 4.5 \cdot 10^{-11} / C^{0.5}. \quad (5)$$

Это соотношение может использоваться для предварительных расчетов оптимизированного фотоприемного устройства в режиме измерения энергии, при этом R выбирается максимальным по допустимому смещению нуля $U_{см}$ за счет темнового тока I_t , фотоприемника. Для случая пороговой энергии, когда $U_c = U_{ш}$, подставляем значение $U_{ш}$ формулы (5) в формулу (1):

$$W_n = 4.5 \cdot 10^{-11} C^{0.5} / S_\lambda. \quad (6)$$

Как видно из формулы (6), минимальная энергия оптимизированного фотоприемного устройства зависит только от емкости C и спектральной чувствительности фотоприемника. Другие параметры фотоприемника, такие как темновой ток I_t , размер приемной площадки, спрятаны в $\Delta f_{ш}$ и C в связи с тем, что параметр W_n характеризует чисто импульсный режим работы, когда длительность воздействующего импульса меньше инерционно-

сти (постоянной времени) фотоприемного устройства. Другой крайний случай (непрерывный режим) характеризуется пороговой мощностью P_n , которая получается из определения чувствительности S_λ и формулы (6):

$$P_n = 4.5 \cdot 10^{-11} C^{0.5} / RS_\lambda. \quad (7)$$

Хотя, казалось бы, емкость в установившемся режиме не работает, но она определяет шумовую полосу частот приемного устройства. Если же за приемным устройством имеется дополнительный узкополосный фильтр, то расчет напряжения шумов, приведенных ко входу приемника ведется по формуле (3).

В последнее время в приборах применяются для измерения сигнала с фотоприемного устройства аналого-цифровые преобразователи (АЦП), в которых время выборки сигнала обычно устанавливается по максимальному сигналу, который с учетом последующих фильтров низких частот всегда будет в переходном режиме, т.е. между режимами, определяемыми формулами (6) и (7). Этот режим легко определяется экспериментально, хотя может быть рассчитан при начальном расчете и выборе типа фотоприемника и фотоприемного устройства; при этом формула (6) наиболее универсальна.

Перечисленные параметры характеризуют качественные показатели приемника излучения, кроме W_n , который характеризует критерий качества фотоприемного устройства и легко измеряется как отношение шумов на выходе фотоприемного устройства $U_{ш}$ к интегральной по времени чувствительности $S_{ин}$. Измерения проводятся в полосе частот реального устройства, поэтому W_n его полностью характеризует; при этом если приемник целиком характеризуется приводимыми выше параметрами, то фотоприемное устройство характеризуется W_n , спектральным диапазоном чувствительности, интегральной по времени чувствительностью в В/Дж, чувствительностью в В/Вт, линейным динамическим диапазоном и длительностью импульсной характеристики.

РЕГИСТРИРУЮЩАЯ СХЕМА

Рассмотрим теперь регистрирующую схему. В современных приборах с микропроцессорным управлением аналоговый сигнал с фотоприемного устройства через фильтры низких частот (иногда полосовые фильтры) поступает на вход аналого-цифрового преобразователя АЦП. Фильтры могут быть и цифровые, однако с точки зрения помехозащищенности от электромагнитных помех аналоговые предпочтительнее. Работа АЦП характеризуется временем измерения (временем выборки) и частотой выборок. Увеличение числа выборок це-

лесообразно только на одно измерение, т.е. в течение одного импульса с фотоприемника, т.к. частотный режим работы приводит к дополнительному расходу мощности источника излучения и энергетически не выгоден [5]. Если использовать многократные выборки в течение времени, определяемом постоянной времени аналоговых фильтров, то можно цифровым способом снизить эквивалентную полосу пропускания фотоприемного устройства, а дополнительное накопление сигнала при этом в ряде случаев возможно получить за счет концентрации энергии в импульсе излучения источника. Для непрерывного режима работы источника излучения или работы с частотной модуляцией энергетического выигрыша не получается, однако возможно эквивалентное сужение полосы пропускания системы обработки информации (а следовательно, случайной составляющей погрешности измерения в $n^{1/2}$ раз, где n — число выборок. Число n редко удается брать больше 128–256, т.к. имеет место медленный дрейф сигнала измеряемой величины. Как правило, оптимальная величина n составляет 32–64. Таким образом, эквивалентную полосу пропускания регистрирующей системы удастся снизить на один порядок. Это может быть заложено в энергетическом расчете при определении $U_{\text{ш}}$ в формуле (3) и $W_{\text{п}}$ в формуле (6). В целом динамический диапазон прибора с импульсным режимом работы получается значительно больше, чем с непрерывным, за счет в основном более высоких энергетических показателей источника (более высокая температура излучения). Кроме того, в нем имеется возможность эффективного использования фотоприемников с худшими параметрами качества (в частности, с большим темновым током).

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ СПЕКТРОФОТОМЕТРА

Целью оптимизации является уменьшение потерь во всех элементах структурной схемы спектрофотометра, и проводится она в два этапа. На первом этапе производится составление самой структурной схемы и выбор ее элементов с минимальными потерями сигнала. На втором этапе производится перераспределение потерь между элементами структурной схемы по критерию получения минимальной погрешности измерения требуемого параметра.

Основной принцип выбора структурной схемы — это минимальные потери сигнала при преобразовании в процессе прохождения сигнала. Преобразования могут быть пространственные, спектральные и временные. Не будем рассматри-

вать все возможные случаи, приведем только отдельные примеры.

Пространственные потери при преобразовании

Равномерно осветить измеряемый образец можно разными способами, например с помощью линзовой или зеркальной осветительной системы, при этом на образец попадает только поток в пределах некоторого телесного угла α , зависящего от геометрического фактора осветительной системы. Линейный угол при этом, как правило, не превышает 20° , и используемый поток составит небольшую часть, равную отношению потока в телесном угле α к потоку по всем направлениям, т.е. пропорциональную площади сегмента, опирающегося на угол α к поверхности шара, на котором вырезан сегмент телесным углом α . Если же образец поместить на место сегмента, а источник в фотометрический шар такого же радиуса, то освещенность на образце в этом случае будет больше в $\rho/(1-\rho)$, где ρ — коэффициент отражения поверхности шара. Это одна из причин, по которой геометрия измерения коэффициента отражения Д/О имеет преимущество перед другими [6].

Другой пример — измерение коэффициента направленного пропускания образца с использованием лазера и фотоприемника с площадью, большей сечения пучка лазера. В этом случае дополнительные потери отсутствуют, имеются только неизбежные потери в образце.

Временные потери

Простой пример: измерение сигнала за время выборки из импульса излучения источника. В случае, когда сигнал на входе АЦП пропорционален мощности и энергии, в этом случае сигнал будет больше в число раз, равное отношению площади импульса излучения к площади части этого же импульса за время выборки.

Спектральные потери

Типичный пример — статический Фурье-спектрометр в сравнении с классическим Фурье-спектрометром. При равном геометрическом факторе в статическом спектрометре происходят дополнительные потери за счет разложения по элементам приемной матрицы.

Анализ составляющих погрешности измерений

Основная погрешность спектрофотометра после исключения ее систематической составляющей при проверке по образцу сравнения может быть представлена в общем виде:

$$\Delta_0 = 2\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Theta_i^2}{3} + \sum_{j=1}^m \sigma_j^2},$$

где Θ_i — граница i -й составляющей неисключенной систематической погрешности (НСП), σ_j — оценка СКО, характеризующая j -ую случайную погрешность. С учетом всех составляющих погрешности предыдущее выражение можно записать в виде

$$\Delta_0 = 1.1\sqrt{\Theta_n^2 + \Theta_\lambda^2 + \Theta_z^2 + 3(\Theta_T^2 + S_e^2)},$$

где составляющие погрешности, связаны: Θ_n — с нелинейностью характеристики преобразования прибора, Θ_λ — с зависимостью коэффициента преобразования от неточности подгонки спектральной чувствительности, Θ_z — с зонной неравномерностью чувствительности по измеряемому образцу, Θ_T — с температурной зависимостью прибора; S_e — погрешность передачи размера единицы образцовым средством измерения, выраженная в виде СКО.

Приведенное значение обоснованно, если значения составляющих погрешности соизмеримы между собой, законы их распределения приняты равномерными, отсутствует взаимная корреляция составляющих, общее количество составляющих не менее трех, и расчет производится для значения доверительной вероятности $P = 0.95$. Эти условия учитывают наихудший случай. При распределении составляющих погрешностей между равномерным и нормальным законами распределения, числовой коэффициент перед радикалом уменьшается. В зависимости от конкретной фотометрической задачи могут быть и другие составляющие погрешности. После теоретической или экспериментальной оценки составляющих общей погрешности принимаются меры схемного и конструктивного характеров по минимизации составляющих, имеющих наибольшие значения. Оптимальным будет случай, когда наибольшие составляющие погрешности примерно одинаковы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В качестве заключения рассмотрим пример неудачного построения схемы спектрофотометра. Это прибор с ПЗС-линейкой, к которым на протяжении последних 30 лет все время возвращаются разработчики из-за простоты обработки сигнала с ПЗС-линейки. Как известно, размер одного элемента в ширину не превышает 15 мкм. Будем считать, что высота матрицы достаточно большая, и на нее попадает весь поток излучения, выходящий из щели. Аберрации оптической системы свето-

сильного монохроматора достаточно большие. Для видимой области спектра кружок рассеяния в фокальной плоскости линзы или зеркала, используемого в монохроматоре, составляет около 0.5 мм. Поскольку каждый элемент ПЗС-линейки работает независимо от соседних, т.е. пространственного суммирования потока не происходит, то сигнал на этом элементе будет пропорционален освещенности в плоскости линейки, т.е. площади элемента линейки. Площадь же элемента линейки почти в 30 раз меньше площади кружка рассеяния оптической системы. Таким образом, в приборе мы имеем потери сигнала по этой причине примерно в 30 раз. Далее, частота опроса линейки обычно составляет сотни Гц. При числе элементов линейки 512 время съема информации с одного элемента составит не более 10 мкс. В этом случае полоса частот аналогового тракта регистрирующей системы спектрофотометра должна быть не менее 100 кГц. В приборе с большим приемником излучения при достаточно медленном сканировании по спектру эквивалентная полоса пропускания регистрирующей системы составит 10–100 гц. Отношение сигнала к шуму в схеме прибора может быть получено в 30–100 раз лучше, т.к. накопления во времени в каждом элементе в приборе с ПЗС не производится. Методы же последующего накопления сигнала дают одинаковые результаты как в приборах с ПЗС-линейкой, так и в приборах с другими приемниками излучения.

Как видно из рассмотренного, здесь приемник излучения не согласован с оптической системой и имеется дополнительное ненужное преобразование уже разложенного в пространстве спектра в короткие временные интервалы, что приводит к дополнительным существенным потерям сигнала. Это один из примеров неоптимальной системы обработки информации в спектрофотометре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кувалдин Э.В. // Научное приборостроение. 2001. Т. 11, № 1. С. 52–55.
2. Кувалдин Э.В., Казаков А.А. Измерение малых энергий нано- и пикосекундных импульсов излучения // Сб. "Импульсная фотометрия". Л.: Машиностроение, 1981. С. 82–88.
3. Леонов Г.Е., Арновеличус В.П., Миколойтис Г.С. Малошумящий предусилитель // ПТЭ. 1984. № 1. С. 126–127.
4. Духанов В.И., Мазуров И.Б., Митин А.А., Чесалов Л.А. Универсальный зарядочувствительный предусилитель // ПТЭ. 1977. № 4. С. 131.
5. Волькенштейн А.А., Кувалдин Э.В. Фотоэлектрическая импульсная фотометрия. Л.: Машиностроение, 1975. 192 с.
6. Кувалдин Э.В. Импульсные фотометры диф-

фузного и смешанного отражения // Оптический журнал. 1995. № 6. С. 48–52.

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 2)

E. V. Kuvaldin

S.I. Vavilov State Optical Institute, Saint-Petersburg

The described method of optimization consists of two parts. The first part [1] 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.