

УДК 535.242.2

© Э. В. Кувалдин

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ РАСЧЕТУ ФОТОМЕТРИЧЕСКОГО ПРИБОРА

Показано, что во всех фотометрических приборах имеется тепловой шумовой порог, снижающий чувствительность прибора. В статье даны некоторые рекомендации для правильного выбора функциональной, оптической и электрической схем фотометров и метод энергетического расчета.

ВВЕДЕНИЕ

Энергетический расчет оптико-электронного прибора преследует три цели: 1) выявить реализуемость прибора для поставленной фотометрической задачи; 2) рассчитать погрешность измерения и требования к отдельным элементам устройства и 3) оптимизировать устройство по погрешности измерения, конструктивным и эксплуатационным требованиям. Эти задачи ставятся перед расчетом любого оптико-электронного прибора, однако для фотометрических приборов они более конкретизированы, т. к. в явном виде присутствует один из главных факторов — погрешность измерения. Поэтому в дальнейшем рассматриваем фотометрические приборы.

Вопросам энергетического расчета посвящены разделы в учебниках и монографиях [1, 2]. Однако в последнее время в связи с широким использованием вычислительной техники в фотометрических приборах появились некоторые особенности в расчете. Используемый в фотометрических приборах линейный динамический диапазон энергий и мощностей излучения охватывает более 20 порядков измеряемой величины, поэтому практически всегда необходим предварительный энергетический расчет любого фотометрического устройства.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ

Рассмотрим упрощенную функциональную схему фотометрического прибора. С точки зрения энергетического расчета источник излучения характеризуется яркостью в выбранном спектральном интервале; оптическая схема, решающая поставленную перед ней фотометрическую задачу, характеризуется потерями энергии и фотометрической погрешностью измерения; приемник излучения — чувствительностью и приведенной к его выходу мощностью шумов в выбранной полосе

частот, определяемой в основном системой обработки измеряемой информации. В схеме присутствуют два типа элементов: элементы, создающие потери энергии излучения, и усилительные элементы (оптические или электронные). Конечным результатом расчета будет определение линейного динамического диапазона устройства, определяемого отношением максимального сигнала в линейном режиме на выходе электронного аналогового тракта к собственным шумам устройства в той же рассматриваемой точке схемы. Линейный динамический диапазон определит случайную составляющую погрешности измерения, вызванную шумами. При сравнительно большой допустимой погрешности измерения запас в динамическом диапазоне позволит улучшить конструктивные показатели прибора и уменьшить потребляемую мощность от источника питания.

Чувствительность идеального прибора будет определяться временем измерения, квантовым выходом приемника излучения и минимальным числом электронов, необходимым для регистрации сигнала с заданной погрешностью.

ТЕПЛОВЫЕ ШУМЫ ФОТОПРИЕМНИКА

Рассмотрим случай двух наиболее эффективных приемников излучения в видимой области спектра. Это кремниевый фотодиод с небольшим темновым током $1 \cdot 10^{-8}$ А, емкостью 100 пФ и чувствительностью 0.25 А/Вт и вакуумный фотоэлемент с чувствительностью 0.04 А/Вт, емкостью 10 пФ и темновым током $1 \cdot 10^{-14}$ А. Задаемся также постоянной времени измерения $\tau = 1$ с, что примерно соответствует времени снятия отсчета по стрелочному или цифровому прибору. Для простоты рассуждения считаем, что шумы фотоприемника имеют только тепловой характер, остальные шумы не рассматриваем, т. е. имеем наиболее благоприятный случай.

Для случая фотоэлемента по формуле из [3] для пороговой энергии

$$W_{\text{п}} = 4.5 \cdot 10^{-11} C^{0.5} / S_{\lambda} \quad (1)$$

получаем $W_{\text{п}} = 3.5 \cdot 10^{-15}$ Дж. При этом сопротивление нагрузки фотоприемника исходя из заданной постоянной времени будет $R_{\text{н}} = \tau / C = 1 \cdot 10^{11}$ Ом, т. е. предельно реальное значение. Для случая фотодиода $R_{\text{н}}$ будет $1 \cdot 10^8$ Ом. При этом исходя из той же постоянной времени емкость в цепи фотоприемника должна быть $1 \cdot 10^{-8}$ Ф и пороговая энергия $9 \cdot 10^{-15}$ Дж, т. е. одного и того же порядка.

Минимальное количество электричества в цепи приемника излучения за это же время (1 электрон $\times 1$ с / К, где К = 0.7 за счет коэффициента отражения от поверхности идеального фотоприемника) составит $2.3 \cdot 10^{-19}$ Дж (можно вести расчет и в единицах мощности, но в единицах энергии это делать проще и нужно задавать меньше параметров).

Из приведенного примера следует, что за счет тепловых шумов на сопротивлении нагрузки имеется пороговое значение энергии, ниже которого не может быть сделана $W_{\text{п}}$. Для лучших приемников различного типа и этот порог почти на 3 порядка выше возможного физического предела. Этот недостаток частично устраняется в ФЭУ за счет усиления тока, до того как получить напряжение на сопротивлении нагрузки вместе с тепловыми шумами. Такие же значения $W_{\text{п}}$ получены экспериментально [4]. Таким образом, даже при идеальных приемниках существует шумовой порог порядка 10^3 квантов. При менее эффективных приемниках (тепловых или других физических принципов действия) или фотоэлектрических приемниках в других областях спектра, где S_{λ} или некоторый эквивалентный параметр, характеризующий к.п.д. преобразования оптического излучения в электрический сигнал, малы, этот порог еще более возрастает. В ряде случаев он возрастает очень значительно, особенно в ИК-области спектра, где к тому же мала и энергетическая яркость источников излучения, что приводит к еще большему снижению линейного динамического диапазона фотометрических приборов в этой области спектра. Единственный способ прямого увеличения динамического диапазона в этом случае — это увеличение габаритной яркости источника, а значит и габаритов фотометрического прибора.

УСИЛИТЕЛИ ФОТОПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА

Если оперировать широко принятым в радиотехнике коэффициентом шума, который характеризуется отношением двух отношений сигнала к шуму на выходе и входе устройства, т. е. показывает, во сколько раз данное устройство ухудшает отношение сигнала к шуму, то в случае порогового устройства коэффициент усиления допорого-

вой части должен быть очень большим, так, чтобы с запасом перекрывать пороговое значение. Тогда общий коэффициент шума будет равен коэффициенту шума послепорогового устройства плюс коэффициент шума допорогового устройства, деленный на потери (рассмотренные выше три порядка в идеальном устройстве). Поэтому шумы приемника излучения в оконечном сигнале будут едва заметны или совсем не заметны. Устройство будет регистрировать послепороговые тепловые шумы, а не шумы (следовательно, и сигнал) приемника излучения, поскольку последний будет также ослаблен. Чтобы шумы приемника излучения преобладали над шумами послепорогового устройства, нужно их усилить вместе с сигналом до значения, превышающего порог. Отсюда следует, что для получения приемлемого коэффициента шума должен быть достаточно большой коэффициент усиления допорогового устройства, так, чтобы перекрыть в нем потери. Как видно из вышеизложенного, он должен быть не менее 3–4 порядков. Такое усиление обеспечивается в ФЭУ и не обеспечивается лавинными фотодиодами. Коэффициент шума может использоваться в качестве удобного критерия оптимального выбора коэффициента усиления отдельных узлов оптико-электронного прибора. Как было сказано ранее, послепороговые шумы — это шумы сопротивления нагрузки приемника излучения и последующих усилительных элементов. Фотоэлектрические и пироэлектрические приемники излучения в эквивалентной схеме замещения представляют собой источники тока, поэтому возможно дополнительное усиление по току без преобразования в напряжение, как это сделано в ФЭУ. По литературным данным [5] коэффициент шума ФЭУ у лучших образцов составляет 2.5–4. Следовательно, при достаточно большом усилении ФЭУ можно приблизиться к пороговой энергии, определяемой энергией электрона. Но это справедливо для пороговых устройств обнаружения сигнала, когда ток сигнала мал. При использовании ФЭУ в измерительном приборе нужно учесть, что шумы ФЭУ растут пропорционально степени 1/2 от суммарного тока сигнала и темного тока. При отношении сигнала к шуму около 100 (цифра, необходимая для более или менее нормального измерительного прибора) нужен коэффициент усиления 10^4 , т. е. потеря динамического диапазона в 100 раз по сравнению с идеальным прибором. Поэтому, несмотря на высокий коэффициент усиления ФЭУ, выигрыш в реальной чувствительности при его применении в фотометре теоретически увеличивается только в $K^{1/2}$, где К — коэффициент умножения динодов ФЭУ, а практически еще меньше, т. к. коэффициент электронного умножения ФЭУ нестабилен и поэтому его значение стараются взять как можно меньше. Кроме того, и коэффициент шума у реальных

ФЭУ имеет большее значение. На практике в однопроводных одноканальных приборах замена фотоэлемента с таким же фотокатодом, что и у ФЭУ, на ФЭУ дает выигрыш в реальной чувствительности всего на один порядок. Сопротивление нагрузки ФЭУ определяет не только напряжение шумов, но и напряжение сигнала, поэтому исходя из условия преобладания сигнала над шумами выведено соотношение, по которому коэффициент усиления ФЭУ и сопротивление нагрузки подбираются таким образом, чтобы напряжение сигнала на сопротивлении нагрузки было не менее 0.05 В [3]. Таким образом, и в случае применения ФЭУ в фотометрическом приборе мы имеем также некоторый порог от тепловых шумов сопротивления нагрузки. Еще больший порог имеется в случае лавинных фотодиодов, имеющих небольшой коэффициент усиления по току.

СПОСОБЫ ПРИБЛИЖЕНИЯ К ТЕОРЕТИЧЕСКОМУ ПОРОГУ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Имеется ли возможность достижения показателей пороговой энергии, близкой к идеальному прибору для измерительных целей? В ряде случаев имеется. Например, в методе счета фотонов, который можно рассматривать как разновидность время-импульсной модуляции. Если создать условия превышения напряжения сигнала на сопротивлении нагрузки ФЭУ или ВЭУ, работающих в режиме счета фотонов, над напряжением шумов на этом же сопротивлении (причем превышение может быть очень незначительным, определяемым только запасом, необходимым для стабильной работы устройства), то при реально достижимых темновых токах возможен режим счета отдельных электронов с фотокатода и получение пороговой энергии. Более подробно требования к режиму работы такого устройства приведены в литературе [6]. Использование ФЭУ в режиме счета фотонов по сравнению с токовым режимом, помимо более высокого отношения сигнала к шуму, имеет еще два важных преимущества для фотометрических приборов. Это — большой линейный динамический диапазон, достигающий шести порядков измеряемого сигнала, и стабильный коэффициент усиления, который не зависит от уровня сигнала (как при время-импульсной или частотной модуляции). Этот метод наиболее предпочтителен при измерении слабых сигналов и обеспечивает широкий динамический диапазон измеряемых потоков на фотокатоде ФЭУ [7, 8].

Другой известный способ — это использование модуляции оптического сигнала по методу, примененному в Фурье-спектрофотометре. Метод характерен тем, что каждая порция сигнала содержит

всю информацию о спектре сигнала, а не только об его части, как в других спектральных методах. Демодуляция же происходит в электронной части прибора. Тогда достаточно небольшого превышения сигнала над шумом, чтобы устройство нормально функционировало. А т. к. в Фурье-спектрометре весь оптический сигнал попадает на приемник излучения, то это обстоятельство существенно снижает требования к линейному динамическому диапазону прибора и обеспечивает ему выигрыш перед другими приборами по этому параметру.

Третий метод состоит в применении гетеродина приема излучения. Здесь за счет большой мощности гетеродина малый принимаемый сигнал переносится через порог. Метод широко известен, но имеет ряд ограничений применения в фотометрических приборах, связанных прежде всего с техническими трудностями и с требованиями высокой стабильности частоты гетеродина.

СХЕМА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ФОТОМЕТРИЧЕСКОГО ПРИБОРА

Энергетический расчет фотометрического прибора следует начинать с определения порога и динамического диапазона по фотометрической схеме измерения. В ГОСТ 24148-84 "Фотометрия. Термины и определения" имеется понятие "геометрический фактор", который представляет собой физическую величину, равную для узкого пучка излучения произведению малой площади dA сечения пучка излучения на малый телесный угол $d\Omega$, который заполняется этим пучком, и на косинус острого угла θ между нормалью к dA и направлением распространения пучка $d^2G = dA \cdot \cos\theta \cdot d\Omega$. Тогда для потока Φ , падающего на приемник излучения, в оптической схеме с геометрическим фактором G и источником излучения с яркостью B имеем

$$\Phi = B \cdot G \cdot \Delta\lambda \cdot \tau,$$

где $\Delta\lambda$ — спектральный интервал, выделяемый оптической системой, τ — коэффициент пропускания оптической системы. Для частного случая, когда оптическая система явно не выражена, например освещение источником в фотометрическом шаре и наблюдение в угле ω , произведение $G \cdot \Delta\lambda \cdot \tau$ будет характеризовать потери в фотометрической схеме. Для случая энергии излучения

$$W = B \cdot G \cdot \Delta\lambda \cdot \tau \cdot t_{\text{и}}, \quad (2)$$

где $t_{\text{и}}$ — средняя длительность импульса излучения для прикидочных расчетов или интеграл по времени от потока излучения в общем случае.

Отношение выходного сигнала (тока или напряжения) к энергии на приемнике излучения определяет интегральную чувствительность S_{λ} при-

емного устройства (ГОСТ24286-88 "Импульсная фотометрия. Термины и определения") фотометрического прибора

$$S_{\lambda} = U_c / B \cdot G \cdot \Delta\lambda \cdot \tau t_n = U_c / W.$$

Отсюда выходное напряжение приемника излучения в режиме измерения энергии равно

$$U_c = B \cdot G \cdot \Delta\lambda \cdot \tau t_n \cdot S_{\lambda}. \quad (3)$$

Пороговая энергия W_n определяется по формуле (1). Отношение W / W_n — определяет динамический диапазон фотометрического прибора. Более подробно энергетический расчет приведен в статьях автора [9, 10, 11].

Как следует из формулы (2) для энергии, наибольшими возможностями будет обладать измерительная система (фотометрический прибор), в которой нет ограничений ни по пространственным, ни по спектральным, ни по временным характеристикам. В этом случае численно выраженное произведение этих трех факторов будет наибольшим, т. е. система будет иметь наибольший коэффициент полезного действия. Однако по каждому параметру имеются физические ограничения и ограничения, связанные с поставленной фотометрической задачей. В хорошо сконструированном приборе должны быть только эти ограничения. В идеале КПД прибора должен быть ограничен только фотометрической задачей. К физическим ограничениям относятся такие, как яркостная температура источника излучения, постоянная времени, спектральная чувствительность и размер приемной площадки приемника излучения, абберрации оптической системы, ограничивающие геометрический фактор фотометрического прибора. Однако существуют и другие ограничения, связанные с условиями работы прибора (например, ограничения по скорости съема информации при работе на быстро движущихся объектах, ограничения по габаритам, весу и потребляемой энергии и т. д.) Это оправданные ограничения. Но могут быть и часто имеют место неоправданные ограничения, связанные с выбором неудачного метода спектрально-временного пространственного преобразования (метода кодирования—декодирования сигнала); применением элементов, ограничивающих спектральный диапазон; временем накопления сигнала; угловым полем зрения и т. д. Это уже неоправданные ограничения, снижающие возможности прибора. Это относится не только к выбору элементной базы, но в большей мере к выбору структурной, оптической и электрической схем прибора.

Как уже говорилось ранее [10], наибольшими возможностями обладает динамический Фурье-спектрометр, поскольку в нем нет принципиальных ограничений ни по спектральным, ни по временным, ни по пространственным характеристи-

кам. В нем может быть сделан максимально возможный геометрический фактор, ограниченный только абберациями; широкий спектральный диапазон, ограниченный только пропусканием оптических элементов и очень большая постоянная времени регистрирующей системы прибора, ограниченная скоростью движения зеркала резонатора. В УВИ-области спектра к нему приближаются некоторые классические спектральные приборы с дифракционной решеткой, имея при этом преимущество по динамическому диапазону (уровню рассеянного света). Приводились примеры неудачных решений, таких как приборы с ПЗС линейками и статический Фурье-спектрометр. Очень часто неоправданно вводятся ограничения по геометрическому фактору прибора (угловому полю зрения или входной апертуре) и в последнее время в связи с увлечениями компьютерной обработкой сигналов — по времени измерения или накопления сигнала. Реже имеются ограничения по спектральному диапазону: например, погоня за излишне высоким спектральным разрешением или применение элементов, ограничивающих спектральный диапазон. Поэтому, выбирая схему прибора с теми или иными рекордными параметрами, не следует забывать и об остальных характеристиках. Прежде всего — о его КПД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Каковы же возможности увеличения динамического диапазона и КПД фотометрического прибора? Это — прежде всего применение эффективных методов усиления фототока приемника излучения без преобразования в напряжение. Затем — разработка функциональных схем приборов с применением "надпороговых" методов модуляции. И, конечно, оптимизация структурной схемы по погрешности измерения. Может быть, более кардинальное решение — переход на неэлектронные методы обработки информации, такие, в которых отсутствует порог в преобразовании сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мирошников М.М.* Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1983. 696 с.
2. *Якушенко Ю.Г.* Теория и расчет оптико-электронных приборов. М.: Машиностроение, 1989. 360 с.
3. *Кувалдин Э.В., Казаков А.А.* Измерение малых энергий нано- и пикосекундных импульсов излучения // Сб. "Импульсная фотометрия". 1981. Вып. 7. С. 82–88.
4. *Кувалдин Э.В.* Высокочувствительные измери-

- тельные пироэлектрические и оптико-акустические приемные устройства энергии импульсов излучения // ОМП. 1987. № 7. С. 43–47.
5. Берковский А.Г., Гавнин В.А., Зайдель И.Н. Вакуумные фотоэлектронные приборы. М.: "Энергия", 1976. 384 с.
 6. Авакян С.В., Андреев Е.П., Афанасьев И.М. и др. Разработка аппаратуры для постоянного космического патруля ионизирующего излучения солнца // Оптический журнал. 2001. Т. 68, № 6. С. 54–62.
 7. Янсон У.В., Арман М.Г., Орлов Р.В. Измерение слабых световых сигналов в режиме счета квантов // Сенсibilизированная флуоресценция смесей паров металлов. Рига: Латв. Университет, 1971. Вып 3. С. 72–80.
 8. Артемьев В.В. Фотоэлектрические счетчики фотонов // ОМП. 1974. № 1. С. 62–68.
 9. Кувалдин Э.В. Импульсные фотометры диффузного и смешанного отражения // Оптический журнал. 1995. № 6. С. 48–52.
 10. Кувалдин Э.В. Выбор и оптимизация функциональной схемы спектрофотометра коэффициентов диффузного отражения (Ч. 1) // Научное приборостроение. 2001. Т. 11, № 1. С. 52–55.
 11. Кувалдин Э.В. Выбор и оптимизация функциональной схемы спектрофотометра коэффициентов диффузного отражения (Ч. 2) // Научное приборостроение. 2001. Т. 11, № 2. С. 26–30.

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

Материал поступил в редакцию 28.03.2003.

SYSTEM APPROACH TO PHOTOMETER ENERGY CALCULATIONS

E. V. Kuvaldin

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

It is shown that all photometry devices have a thermal noise threshold limiting the device sensitivity. The paper gives some recommendations for good choice of functional, optical and electrical schemes of photometers and a method of energy calculations.