

КОНТРАСТНОСТЬ ИЗОБРАЖЕНИЙ БИООБЪЕКТОВ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ МЕТОДОМ СЧЕТА ФОТОНОВ

The general scheme of a single optical photon counter is discussed. Some disadvantages of the single photon counting technique contrast images treated are shown. It is the non linearity as the reason of contrast decrease is proved.

Введение. Метод счета отдельных оптических фотонов, возникший полвека назад, в настоящее время хорошо разработан с теоретической и практической позиций [1]. При этом причины нелинейности световой характеристики счетчика фотонов [2] в меньшей степени связывают с перегрузками фотоприемника, в качестве которых используют фотоэлектронные умножители (ФЭУ) [3], диссекторы [4] и лавинные фотодиоды (ЛФД) [5]. Существенно большее влияние на эту характеристику фотометра оказывают последующие блоки обработки одноэлектронных импульсов, возникающих на выходе фотоприемника. В этом случае линейность устройства в целом определяется главным образом широкополосностью и способностью выдерживать импульсные перегрузки применяемых усилителей и дискриминаторов. Несмотря на прогресс в конструировании и элементной базе этих блоков, полоса частот низкошумящего усилителя остается на уровне 100 МГц, а мертвое время дискриминатора 5–10 нс, что все еще уступает характеристикам быстрых ФЭУ и ЛФД.

При обработке изображений, получаемых в различных биофизических и микробиологических исследованиях, например при изучении роста колоний микроорганизмов, нелинейность счетчика фотонов приводит к кажущемуся снижению контрастности ярких изображений. При этом из-за невозможности различить отсчеты, обусловленные фоновыми свечениями и сигналом, формирующим точки изображения, вычитание фона и собственных шумов счетчика фотонов приведет к неточностям фотометрии объекта [6].

Общая схема счетчика фотонов. На рис. 1 показана общая базовая схема счетчика фотонов, которая сохраняется как ядро и более сложных схем. В этой схеме регистрируемое излучение объекта 1 с помощью оптической системы 2 фокусируется на фотоприемник 3, генерирующий одноэлектронные импульсы. Эти импульсы широкого амплитудного диапазона поступают на широкополосный усилитель 4, который согласует амплитудные диапазоны выходных импульсов фотоприемника и рабочий диапазон дискриминатора 5, порог срабатывания которого оптимизируется так, чтобы отсеять шумовые импульсы преимущественно малой амплитуды, но пропустить одно-

электронные импульсы, инициированные воздействием отдельных фотонов источника сигнала 1 на фотоприемник 3, выбившие из его фотокатода в результате фотоэлектронной эмиссии одиночные фотоэлектроны. Дискриминатор 5 в случае срабатывания формирует на выходе стандартные импульсы, подаваемые на счетчик 6. Счетчик работает в течение заданного интервала времени, затем его показания регистрируются, а содержимое сбрасывается.

Для оперативной настройки оптимальных условий отбора одноэлектронных импульсов из смеси шумовых и фоновых часто применяют многоканальный амплитудный анализатор 8 (или, в современном варианте, аналогово-цифровой преобразователь на линии с компьютером). В этом случае по форме амплитудного распределения импульсов опытный оператор может быстро подобрать и коэффициент передачи усилителя 4, и порог срабатывания дискриминатора 5. Часто для оптимизации работы счетчика фотонов приходится одновременно подбирать и рабочее напряжение питания фотоприемника 3, обеспечиваемое регулируемым высокостабильным источником питания 7. Сообщаемые изготовителями режимы питания хороши только для законченного прибора, но сохранение параметров оптимального питания в течение длительного времени вызывает сомнения из-за заметного дрейфа характеристик фотоприемника в процессе эксплуатации.

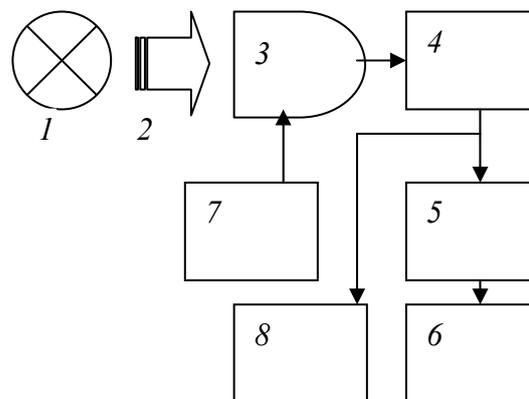


Рис. 1. Общая схема счетчика фотонов:
1 – источник светового сигнала; 2 – оптическая система; 3 – фотоприемник; 4 – усилитель;
5 – дискриминатор; 6 – счетчик импульсов;
7 – источник питания фотоприемника;
8 – анализатор амплитуд импульсов

Дискриминатор 5 при работе в сильных радиационных полях может работать по схеме амплитудного окна, когда дискриминируются также и импульсы большой амплитуды, вызванные сцинтилляциями в стекле ФЭУ. Однако в других применениях такое усложнение схемы неактуально.

Усилитель 3 может быть построен по разным схемам в зависимости от типа фотоприемника и поставленной задачи. Так, фотоумножители и диссекторы являются токовыми приборами, и их выходной сигнал в действительности должен измеряться в единицах заряда. Поэтому усилитель следует строить по зарядочувствительной схеме. Вариантом ее может быть усилитель тока с последующим быстродействующим активным или пассивным интегратором. В то же время во многих случаях используют усилители напряжения, несколько теряя при оптимизации порога дискриминации из-за размытия амплитудного распределения.

Схема телевизионного счетчика фотонов не отличается принципиально от приведенной на рис. 1, но содержит дополнительные блоки, обеспечивающие развертку, оптическую или электронную, изучаемого изображения. В первом случае в оптическую систему 2 включается сканер, а фотоприемником может служить ФЭУ или ЛФД. При этом развертка будет медленной и пригодной для анализа лишь квазистатических изображений, но светосила устройства – очень высокой. Во втором случае фотоприемником служит телевизионная передающая трубка мгновенного действия – диссектор, в котором уже развертка электронного изображения фотокатода осуществляется электромагнитными полями. При этом легко достигается стандарт частоты вещательного телевидения, однако чаще используют менее быстрые пошаговые развертки.

Статистика отсчетов. В связи с выраженным квантовым характером слабых оптических сигналов отсчеты, регистрируемые счетчиком фотонов, имеют вероятностную природу. Чаще всего в качестве статистического закона при этом принимают распределение Пуассона:

$$P(N, T) = \frac{\bar{N}^N e^{-\bar{N}T}}{N!},$$

где $P(N, T)$ – вероятность получения N отсчетов за время T , если среднее число отсчетов равно \bar{N} . Точность измерения характеризуют в этом случае отношением сигнал / шум (ρ), которое для данного распределения вычисляется через измеренные значения отсчетов при наличии (N) и отсутствии (N_B) измеряемого сигнала:

$$\rho = \frac{N_S}{\sqrt{N_S + 2N_B}},$$

где $N_S = N - N_B$ – число отсчетов, обусловленных собственно измеряемым сигналом.

В случаях, когда распределение Пуассона становится неприменимым или время измерения величин N и N_B выбирается неодинаковым, последнее выражение усложняется.

Фотометрия контрастных сигналов. Выражение для отношения сигнал / шум может быть применено и для оценки точности измерения сигнала на оптическом фоне, создающем контраст K . При этом удобнее пользоваться выражением

$$\rho = K \sqrt{N_B / (K + 2)}.$$

Фоном могут быть паразитные засветки фотометрируемой сцены, свечение прилегающего к анализируемому объекту пространства (рассеянный свет, фосфоресценция и т. п.). Для сколь угодно линейного счетчика фотонов заданное значение ρ обеспечивается с ростом такого фона квадратичным повышением контрастности изображения, что иллюстрируется рис. 2.

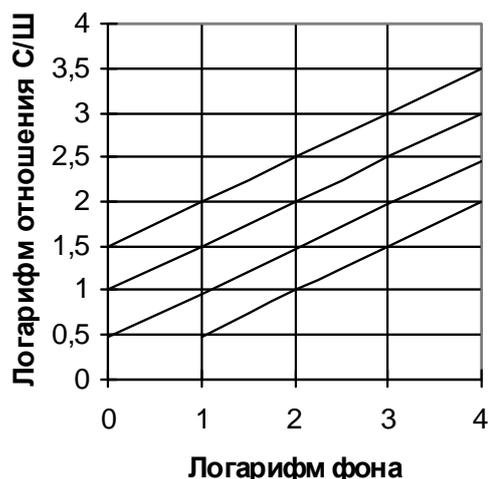


Рис. 2. Влияние контрастности изображения на отношение сигнал / шум при различном фоне. Контраст возрастает от 1 до 1000 шагами на порядок при переходах от нижней к верхней линии

Однако при наличии просчетов столь простые зависимости, выглядящие линейными в дважды логарифмическом масштабе на рис. 2, искажаются. С ростом мертвого времени счетчика этот эффект становится заметным сначала на верхней линии, а затем постепенно начинает сказываться и при меньших контрастах.

Пренебрегая искажениями статистического закона распределения и ограничиваясь мертвым временем непродлевающего типа (τ), будем иметь снижение регистрируемого количества отсчетов M , тем большее, чем выше их средняя скорость счета (число отсчетов в единицу времени – m и n для измеренной и действительной величин):

$$m = n / (1 + n\tau)$$

или

$$M = N / (1 + N\tau / T).$$

Тогда дисперсия сигнала станет равной

$$D(N_S) = M / (1 - M\tau / T)^2 + M_B / (1 - M_B\tau / T)^2.$$

За исключением случая самых низких контрастов, при которых обычно проводятся лишь предварительные визуальные оценки, поправкой при M_B можно пренебречь. Поправка при первом члене станет также несущественной при $M\tau / T \ll 1$, что достигается либо при малых скоростях счета, либо при больших по сравнению с $M\tau$ периодах накопления отчетов. В других случаях учет поправки после перехода к действительным значениям отчетов в практически важных условиях небольшого количества просчетов ведет к

$$D(N_S) = (N_S + 2N_B) / (1 - M\tau / T).$$

Соответственно, отношение сигнал / шум трансформируется к виду

$$\rho = N_S / \sqrt{\frac{N_S + 2N_B}{1 - N\tau / T}}.$$

В единицах контраста (K) при заданном уровне фона это выражение принимает вид

$$\rho = KN_B / \sqrt{\frac{K + 2}{1 - (K + 1)\tau / TN_B}}.$$

Заключение. Очевидно, отношение сигнал / шум при наличии мертвого времени

непродлевающего типа оказывается несколько ниже, чем в идеальном счетчике, и может стать весьма низким при значительных перегрузках, несмотря на то, что скорость счета импульсов все еще повышается. При наличии мертвого времени продлевающего типа ситуация с точностью измерений еще хуже из-за возможного снижения регистрируемой скорости счета импульсов с ростом освещенности и контрастности.

Литература

1. Одноэлектронные фотоприемники / С. С. Ветохин [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 246 с.
2. Световые характеристики диссектора, работающего в одноэлектронном режиме / А. П. Ташкун [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 1973. – № 3. – С. 258–260.
3. Ветохин, С. С. Одноэлектронные характеристики фотоумножителей для счета фотонов / С. С. Ветохин, И. В. Резников // Приборы и техника эксперимента. – 1977. – № 7. – С. 57–62.
4. Ветохин, С. С. Диссекторы – счетчики фотонов / С. С. Ветохин, И. В. Резников // Опτικο-механическая пром-сть. – 1980. – № 8. – С. 46–50.
5. Исследование лавинных МДП-фотоприемников в режиме счета фотонов / С. С. Ветохин [и др.] // Доклады АН БССР. – 1987. – Т. 31, № 5. – С. 141–144.
6. Ветохин, С. С. Влияние контраста изображения на отношение сигнал/шум одноэлектронного диссектора / С. С. Ветохин // Опτικο-механическая пром-сть. – 1978. – № 6. – С. 65–66.