

В.А. Чикуров

О ПРОСТРАНСТВЕННОМ РАЗРЕШЕНИИ ТЕЛЕВИЗИОННОГО СЧЕТЧИКА ФОТОНОВ

Предложены соотношения для инженерного расчета ширины функции рассеяния точки (ФРТ) и частотно-контрастной характеристики телевизионного счетчика фотонов при цифровом накоплении нормализованных откликов одноэлектронных событий. Приводится выражение для оценки потенциального значения ширины ФРТ.

Телевизионные счетчики фотонов (ТСФ), применяемые для регистрации предельно слабых изображений (например, спектров флуоресценции или комбинационного рассеяния), обычно строят на основе микроканальных усилителей яркости (УЯ), линейных фотоприемников с зарядовой связью (ЛФПЗС) или телевизионных передающих трубок (ТПТ) и микроЭВМ. Мерой пространственного разрешения таких счетчиков является функция рассеяния точки (ФРТ) или ее Фурье образ — частотно-контрастная характеристика (ЧКХ). Несмотря на имеющиеся разработки ТСФ, в литературных источниках эти характеристики представлены не полностью.

В настоящей статье дана оценка потенциального значения ширины ФРТ и предложены расчетные соотношения, связывающие ширину ФРТ (ЧКХ) с характеристиками основных компонентов составного фотоприемника ТСФ для случая оценок нормализованных пачек импульсов, соответствующих одноэлектронным событиям.

Ширину ФРТ, часто имеющую колоколообразный вид [1], можно представить как суммарную ошибку определения истинных координат одноэлектронных событий.

$$\Delta R \simeq \sqrt{\Delta R_{\text{э.к.л.}}^2 + \Delta R_{\text{мк.п.}}^2 + \Delta R_{\text{сч.}}^2},$$

где $\Delta R_{\text{э.к.л.}}$, $\Delta R_{\text{мк.п.}}$, $\Delta R_{\text{сч.}}$ — ошибки, вносимые соответственно электростатической катодной линзой УЯ, микроканальной пластиной и устройством считывания сцинтилляций.

Первую составляющую ошибки оценим диаметром кружка рассеяния электростатической катодной линзы УЯ, который можно представить в виде [2]

$$\Delta R_{\text{э.к.л.}} = D = 1,2 V/E,$$

где V_0 — начальная энергия электрона, покинувшего фотокатод УЯ; E — напряженность электростатического поля у фотокатода. Ошибку, вносимую микроканальной пластиной, можно оценить диаметром ее канала $\Delta R_{\text{мк.п.}} \simeq d_{\text{мп.п.}}$. Без предварительного выбора устройства обработки видеосигнала дисперсию оценки координаты (R_0) максимального значения интенсивности считываемой сцинтилляции оценим как нижнюю границу несмещенной оценки параметра согласно неравенству Рао—Крамера [3]

$$D_{R_0}^{\wedge} \geq - \left(\frac{d^2 q_F(R_0)}{d^2 R_0} \right)^{-1} \Big|_{R_0=R_{00}},$$

где

$$q_F(R_0) = \frac{2}{N_0} \int_0^r \left[F(R, R_0) F(R, R_{00}) - \frac{1}{2} F^2(R, R_0) \right] dR;$$

R_{00} — истинная координата максимального значения считываемой сцинтилляции; r — протяженность сцинтилляции; N_0 — спектральная плотность мощности белого шума; $F(R)$ — аналитическое выражение интенсивности считываемой сцинтилляции.

Для случая $F(R)$, имеющей форму Гауссова импульса, нетрудно показать

$$D_{R_0}^{\wedge} = \frac{4}{\pi} D_{\text{сч.}}^2 \left(\frac{2E_{\text{сч.}}}{N_0} \right)^{-1},$$

где $D_{\text{сч.}}$ — диаметр сцинтилляции, $E_{\text{сч.}}$ — энергия сцинтилляции.

Предположив, что ошибка считывания распределена по нормальному закону, для которого ширина по полувысоте пика связана со среднеквадратическим отклонением соотношением $\Delta R_{0,5} = 2,36\sigma$, потенциальную ошибку получим в виде

$$\Delta R_{\text{сч.н}} = \frac{4,72}{\sqrt{\pi}} D_{\text{сч}} \sqrt{\frac{2E}{N_0}}.$$

Считая, что диаметр кружка рассеяния электростатической катодной линзы перекрывает интервал $\pm 3\sigma$, потенциальное значение ширины ФРТ по полувысоте пика примет вид

$$\Delta R_{\text{н0,5}} = \sqrt{K_0^2 \left[\left(0,47K_0 \frac{V_0}{E} \right)^2 + d_{\text{мк.л}}^2 \right] + (2,67N_{\text{сч}})^2 \frac{N_0}{2E}},$$

где K_0 — масштаб переноса изображения согласующей оптики составного фотоприемника; K_0 — коэффициент электронно-оптического увеличения УЯ. Для наиболее употребимых значений $V_0 \approx 1$ эВ; $E = 50$ В/мм; $d_{\text{мк.л}} = 10$ мкм; $D_{\text{сч}} = 0,1$ мм [2]; $K_0 = K_0 = 1$ [4] $2E/N_0 = 10^3$; $\Delta R_{\text{н0,5}}$ составляет величину 16 мкм.

При считывании сцинтилляций с экрана УЯ с помощью ЛФПЗ или ТПТ ошибка нахождения центра сцинтилляций определяется способом обработки видеосигнала и стабильностью раstra. В случае оцентровки пачек нормализованных импульсов, соответствующих считываемым сцинтилляциям, центры сцинтилляций находятся с ошибкой, соответствующей расстоянию между соседними импульсами пачки

$$\Delta R_{\text{сч.н}} \approx 0,6 K_0 K_0 \frac{d_{\text{фк}}}{N_p},$$

где $d_{\text{ф.к}}$ — размер фоточувствительной поверхности фотокатода ТПТ в направлении кадровой развертки или размер фоточувствительной поверхности ЛФПЗС; N_p — число строк раstra ТПТ или количество фоточувствительных элементов ЛФПЗС. Ошибку, вносимую нестабильностью раstra ТПТ, можно оценить соотношением [5]

$$\Delta r_p \approx \sqrt{(R_y \delta E_p)^2 + \left(\frac{R_y}{2} \delta E_a \right)^2 + \left[\left(R_x + \frac{B}{2} \right) \gamma \right]^2},$$

где δE_p , δE_a — относительные нестабильности напряжений питания развертки и анода соответственно; B — сторона раstra; γ — угол поворота раstra, определяемый в основном нестабильностью источников питания фокусирующей катушки и фокусирующего электрода; R_x , R_y — координаты центра считываемой сцинтилляции на фотокатоде ТПТ. При значениях $\delta E_p = \delta E_a = 0,1\%$; $\gamma = 10^{-3}$ рад; $B = 15$ мм; $R_x = 10$ мм; $R_y = 7,5$ мм нестабильность раstra дает ошибку $\Delta r_p = 19$ мкм.

В предположении, что ФРТ имеет огибающую, описываемую нормальным законом распределения, выражение для ширины ФРТ по полувысоте ее пика примет вид

$$\Delta R_{\text{оц0,5}} \approx \sqrt{K_0^2 \left[\left(0,47K_0 \frac{V_0}{E} \right)^2 + d_{\text{мк.л}}^2 \right] + \left(0,6 \frac{d_{\text{фк}}}{N_p} \right)^2 + \Delta r_p^2}. \quad (1)$$

При отсутствии оцентровки сигнала происходит почти трехкратное возрастание ширины ФРТ [4] и соответственно

$$\Delta R_{\text{Б 0,5}} \approx 3 \Delta R_{\text{оц0,5}},$$

где $\Delta R_{\text{Б0,5}}$ — ширина ФРТ без оцентровки. Необходимо отметить, что в случае использования ФЛПЗС положение и размер ее фоточувствительных элементов неизменны, поэтому можно принять $\Delta r_p \approx 0$.

На рис. 1 представлена зависимость $\Delta R_{\text{оц0,5}}$ от числа строк ТВ-раstra N_p , рассчитанная в соответствии с выражением (1) для определенных выше значений параметров, входящих в это выражение. Как видно из рисунка, при $N_p \geq 300$ существенного уменьшения ширины ФРТ не происходит, поэтому в данном случае целесообразно использование основных характеристик видеосигнала, принятого для ТВ-вещания, где число строк полукадра $N_{\text{стр}} = 312,5$.

При принятом предположении, что ФРТ имеет Гауссову огибающую, частотно-контрастная характеристика, являющаяся Фурье образом ФРТ [2], может быть представлена соотношением

$$T(\nu) = \exp[-3,5(\Delta R_{\text{оц0,5}} \nu)^2],$$

где ν имеет размерность, штр./мм. Частотно-контрастные характеристики, рассчитанные в соответствии с этим выражением для потенциального значения ширины ФРТ и ширины ФРТ с оцентровкой и без оцентровки пачек импульсов, приведены на рис. 2 (кривая 1 — $\Delta R_{\text{н0,5}} = 19$ мкм, 2 — $\Delta R_{\text{оц0,5}} = 35$ мкм, 3 — $\Delta R_{\text{Б0,5}} = 105$ мкм).

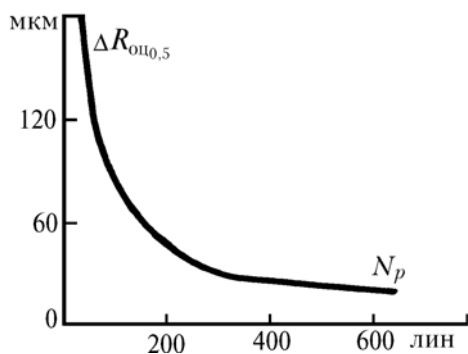


Рис. 1

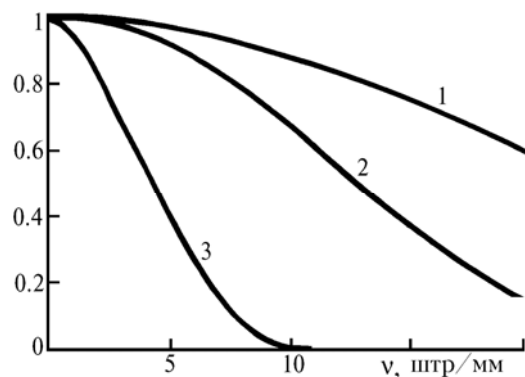


Рис. 2

Тип составного фотоприемника	Усилитель яркости		Масштаб переноса изображения, согласно оптики, K_0	Размер фоточувствительной поверхности ППТ, мм · мм	Ширина функции рассеяния точки ТСФ, мкм				Ссылка
	Рабочий диаметр фотокатода (мм)	Коэффициент электронно-оптического увеличения, K_0			с оцетровкой		без оцетровки с использованием каждого третьего импульса пачки		
					экспе-ри-мент	ра-счет	экспе-ри-мент	ра-счет	
ПИМ-104 МП+ +сигнал 2+ +ЛИ-805	8	2	1	24×32	40	55,8	—	—	[4]
ЭОП с МКП+ +сигнал 2+ +ЛИ-801	15	1,5	1	24×32	50	52,5	—	—	[4]
УЯ с МКП+ +Гелиос 44-2+ +ЛИ-702-3	14	1	1	15×20	42	37,6	297	338	
ЭОП с МКП+ +Гелиос 40+ +ЛИ-706	15	1,5	1	15×20	40	41	—	—	[4]
ПИМ-104 МП+ +ВОП+1200 ЦМ-2	8	2	1	8,6×12	—	32	—	—	

В заключение в таблице сведены сравнительные величины экспериментально измеренных (по литературным источникам) и рассчитанных в соответствии с предложенным соотношением (1) ширины ФРТ для различных составных фотоприемников. Данные таблицы подтверждают работоспособность предложенных соотношений, которые могут быть использованы для обоснованного выбора компонентов составного фотоприемника ТСФ.

1. Афанасьев В. Л., Цуккерман И. И. //Техника средств связи. Сер. Техника телевидения. 1987. Вып. 5. С. 3—12.
2. Бутслов М. М., Степанов Б. М., Фанченко С. Д. //Электронно-оптические преобразователи и их применение в научных исследованиях. М.: Наука, 1978. 431 с.
3. Тихонов В. И. //Статистическая радиотехника. М.: Сов. Радио, 1966. 543 с.
4. Силькис Э. Г. //Разработка и создание многоканальной системы счета фотонов для лазерной спектроскопии комбинационного рассеяния света. Дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., 1987. 241 с.
5. Апрелинов В. В., Грановский В. А. //Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 1967. Вып. 5. С. 81—90.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
29 июня 1992 г.

V. A. Chikurov. On Spatial Resolution of a TV Photon Counter.

Relations, which enable one to calculate the width of the point spread function (PSF) and frequency-contrast characteristic of a TV photon counter operating in the regime of digital storage of normalized single photon events are derived. An expression for an estimate of a potential PSF width is given.