

Раздел III. Информационная безопасность телекоммуникационных систем

УДК 621.396.624

К.Е. Румянцев, А.Е. Амплиев

ДОСТОВЕРНОСТЬ ОДНОФОТОННОЙ РЕГИСТРАЦИИ В ДВУХКАНАЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Получены соотношения для расчета достоверности регистрации фотонов в двухканальной оптической системе с применением однофотонных фотоэмиссионных приборов. Используя трапецеидальную аппроксимацию формы однофотонного импульса, доказано, что переход от одноканальной к двухканальной оптической системе с однофотонной регистрацией гарантирует снижение массы и стоимости антенного комплекса, увеличивает достоверность регистрации фотонов, снижает требования как к широкополосности фотоприемных каналов, так и к быстродействию канала обработки, расширяет динамический диапазон регистрации фотоэлектронов.

Однофотонный фотоэмиссионный прибор; однофотонный импульс; двухканальная оптическая система; достоверность однофотонной регистрации.

К.Е. Rumyantsev, A.E. Ampliev

RELIABILITY OF SINGLE PHOTON REGISTRATION IN TWO-CHANNEL OPTICAL SYSTEM

Ratios for calculation of reliability of registration of photons in two-channel optical system with use of single-photon photoissue devices are received. Using trapetseidally approximation of a form of an single -photon impulse, it is proved that transition from single-channel to two-channel optical system with single-photon registration guarantees decrease in weight and cost of an antenna complex, increases reliability of registration of photons, reduces requirements both to a shirokopolosnost of photoreception channels, and to speed of the channel of processing, expands a dynamic range of registration of photoelectrons.

The single photon photoissue device; single photon impulse; two-channel optical system; reliability of single photon registration.

Однофотонные счётчики (счётчики фотонов) находят широкое применение в лазерной локации [1], связи [2], поисковой аппаратуре [3], квантовой криптографии [4], астронавигации и медицине [5], поскольку обеспечивают высокую чувствительность фотоприёмного канала.

Типовой режим счёта фотонов предполагает применение однофотонных фотоэмиссионных приборов (ОФЭП) с внутренним умножением заряда, способных отдельно регистрировать генерируемые фотокатодом первичные электроны (фотоэлектроны, ФЭ) в течение заданного времени измерения (наблюдения) $\tau_{\text{изм}}$ [6].

Впервые в [3] поставлен вопрос о перспективности применения многоканальных систем, в которых фотоны регистрируются не одной оптической антенной с диаметром D , а $N_{\text{ант}}$ антеннами с диаметром каждой $D_{\text{ант.пр}i} = D/\sqrt{N_{\text{ант}}} = D_{\text{ант.пр}}$, $i = \overline{1, N_{\text{ант}}}$. Поскольку суммарная площадь приёма

при переходе от одноканального к многоканальному приёму фиксирована $N_{\text{ант}} \pi D_{\text{ант.пр}}^2 / 4 = N_{\text{ант}} \pi (D / \sqrt{N_{\text{ант}}})^2 / 4 = \pi D^2 / 4$, то и энергия принимаемого оптического излучения (среднее количество фотонов \bar{n}) за время измерения (наблюдения) $\tau_{\text{изм}}$ остается неизменным.

Следовательно, переход от одноканального к многоканальному приёму оптического излучения теоретически не сказывается на точности измерения мощности излучения при сохранении той же площади приёма и применении идеальных однофотонных счётчиков.

В то же время применение антенны большего диаметра при заданных требованиях к абберациям оптики предполагает более высокое качество обработки поверхности оптических антенн. Следовательно, в случае многоканальной системы, при той же площади приёма, значительно снижается стоимость изготовления аппаратуры [7]. Действительно, в случае применения $N_{\text{ант}}$ приёмных антенн требуется для поддержания той же суммарной площади приёма в $\sqrt{N_{\text{ант}}}$ раз меньшего диаметра каждой антенны. Масса же линзовых антенн пропорциональна четвертой степени её диаметра при постоянном фокусном расстоянии [7]. Следовательно, общая масса линзовых антенн будет в $N_{\text{ант}}$ раз меньше массы одиночной приёмной антенны. Кроме того, применение антенн с большим диаметром предполагает предъявление более жёстких требований к качеству обработки оптических поверхностей линз или зеркал для поддержания на том же уровне аббераций в системе.

Снижение массы и требований к качеству обработки оптических поверхностей ведёт к понижению стоимости оптических антенн, как правило, определяющих стоимость всей аппаратуры (особенно при расположении на летательных аппаратах). Справедливо и обратное утверждение: при фиксированной массе приёмной оптической антенны удастся снизить требования к мощности лазерного передатчика.

Следовательно, переход к N -канальной системе регистрации фотонов позволяет в $N_{\text{ант}}$ раз снизить массу и ещё в большей степени стоимость аппаратуры.

В [3] указывалось на дополнительное преимущество при переходе от одноканальной к многоканальной системе, связанное с повышением достоверности регистрации числа фотоэлектронов. Однако, количественный анализ выигрыша в работе не проводился.

Цель исследований состоит в сравнительном анализе достоверности измерения мощности оптического излучения (числа фотоэлектронов) в одноканальной и двухканальной системах на основе ОФЭП при фиксированной площади оптических приёмных антенн.

Структурная схема двухканальной оптической системы в режиме счёта фотонов включает два идентичных канала регистрации фотонов, цифровые выходы которых соединены соответственно с первым и вторым входами цифрового сумматора (рис. 1). Выход сумматора является выходом двухканальной системы.

Каждый канал содержит последовательно соединённые приёмную оптическую антенну, ОФЭП, импульсный усилитель (ИУ), амплитудный дискриминатор (АД) и электронный двоичный счётчик.

Блок управления задаёт момент начала и окончания регистрации потока фотонов.

Принимаемое оптическое излучение преобразуется фотокатодами ОФЭП в поток фотоэлектронов (первичных электронов). Использование, например, фотоэлектронного умножителя позволяет получить довольно мощный отклик – однофотонный импульс (ОФИ) – на каждый сгенерированный фотоэлектрон. После

усиления ОФИ и нормировки в АД по амплитуде сформированный поток импульсов направляется на счётный вход счётчика. По истечении времени измерения $\tau_{изм}$ с помощью импульса с блока управления накопленное количество зарегистрированных импульсов в двоичной форме выводится для последующей обработки. При этом содержимое электронных двоичных счётчиков обнуляется.

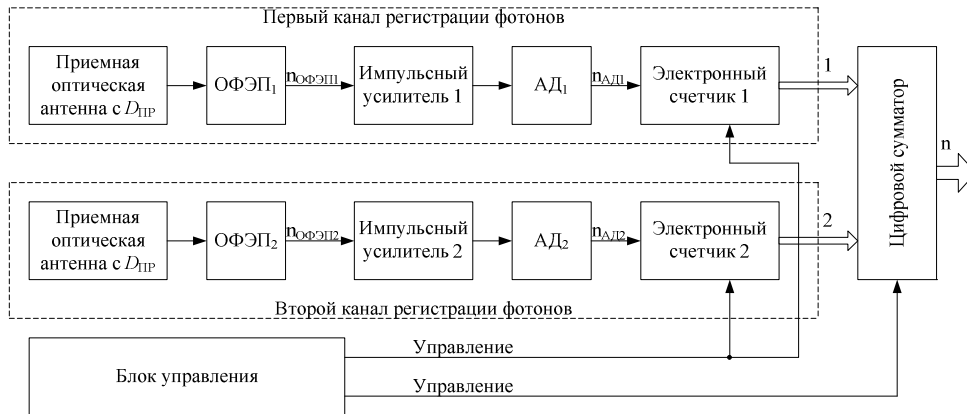


Рис. 1. Структурная схема двухканального однофотонного регистратора

Пусть среднее число ФЭ, генерируемых каждым ОФЭП за время измерения $\tau_{изм}$, фиксировано $\bar{n}_{ОФЭП1} = \bar{n}_{ОФЭП2} = \bar{n}_{ОФЭП} = \bar{n}/2$ и равно половине от среднего числа генерируемых ФЭ \bar{n} в двухканальной системе.

В качестве критерия эффективности измерительной системы принимаем, как предложено в [8], достоверность Pr_{val} , под которой понимается вероятность правильной регистрации всех n сгенерированных фотоэлектронов за заданное время измерения $\tau_{изм}$.

В общем случае, достоверность

$$Pr_{val} = \sum_{n=0}^{\infty} Pr\{n|\bar{n}\} \cdot Pr\{n|n\} \quad (1)$$

определяется вероятностью регистрации n ФЭ системой за время $\tau_{изм}$ при среднем числе генерируемых ФЭ \bar{n} , а также вероятностью правильной регистрации всех n сгенерированных ФЭ $Pr\{n|n\}$.

Для описания случайного процесса регистрации n ФЭ за время измерения $\tau_{изм}$ используется закон Пуассона [9]

$$Pr\{n|\bar{n}\} = \frac{\bar{n}^n}{n!} \exp(-\bar{n}). \quad (2)$$

В двухканальной системе количество n сгенерированных ФЭ перераспределяется между каналами. Пусть в первом канале сгенерировано n_1 ФЭ, тогда во втором канале будет однозначно сгенерировано $n_2 = n - n_1$ ФЭ. Следовательно, вероятность регистрации в первом канале n_1 ФЭ при известном суммарном количестве сгенерированных системой n ФЭ равно

$$Pr\{n_1|n\} = 1/n. \quad (3)$$

Применительно к двухканальной системе выражение (1) может быть преобразовано к виду

$$Pr_{\text{val}} = \sum_{n=0}^{\infty} Pr\{n|\bar{n}\} \sum_{n_1=0}^n Pr\{n_1|n\} \cdot Pr\{n_1|n_1\} \cdot Pr\{n_2|n_2\}.$$

С учётом формул (2) и (3) находим

$$Pr_{\text{val}} = (1 + \bar{n}) \exp(-\bar{n}) \rightarrow \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{n_1=0}^n \frac{1}{n} \cdot \frac{\bar{n}^n}{n!} \cdot \exp(-\bar{n}) \cdot Pr\{n_1|n_1\} \cdot Pr\{n-n_1|n-n_1\}. \quad (4)$$

В формуле (4) учтено, что события отсутствия генерации ФЭ ($n = 0$) или генерация одного ФЭ ($n = 1$) двухканальной системой будут достоверно измерены (зарегистрированы).

В [8] получены выражения для правильной регистрации k из k ФЭ

$$P\{k|k\} = [1 - (k-1) \cdot \alpha]^k. \quad (5)$$

В формуле (5) параметр α учитывает влияние на условные вероятности счёта фотоэлектронов параметров ОФЭП (числа динодов N_d , полосу пропускания $\Pi_{\text{ОФЭП}}$, постоянную времени пролета электронами между двумя соседними динодами τ_d), времени измерения $\tau_{\text{изм}}$, уровня амплитудной дискриминации $U_{\text{АД}}$ и амплитуды ОФИ $U_{\text{ОФИм}}$.

Установлено [10], что параметр α связан с минимальной временной задержкой между моментами генерации двух ФЭ в ОФЭП для их раздельной регистрации в АД $\tau_{\text{ОФЭП.мин}}$ и минимальным временным зазором между счётными импульсами с выхода АД для их регистрации двоичным счётчиком (ДС) $\tau_{\text{ДС.мин}}$:

$$\alpha = \frac{\tau_{\text{ОФЭП.мин}} + \tau_{\text{ДС.мин}}}{\tau_{\text{изм}}}. \quad (6)$$

Используя трапецеидальную аппроксимацию формы ОФИ, в [8] получено выражение для расчёта минимальной величины временного разнесения моментов появления двух фотоэлектронов

$$\tau_{\text{ОФЭП.мин}} = \left(16 - 7,8 \cdot \frac{U_{\text{АД}}}{U_{\text{ОФИм}}} \right) \cdot \tau_d. \quad (7)$$

В формуле (7) постоянная времени пролета электронами между двумя соседними динодами τ_d и полоса пропускания $\Pi_{\text{ОФЭП}}$ по уровню 0,707 ОФЭП связаны соотношением

$$\Pi_{\text{ОФЭП}} \cdot \tau_d = \frac{1}{2\pi} \sqrt{N_d \sqrt{2} - 1} = b_{\text{ОФЭП}}, \quad (8)$$

где $b_{\text{ОФЭП}}$ – коэффициент, изменяющийся в пределах от 0,048 до 0,036 для ОФЭП с числом динодов от 8 до 14 соответственно.

Из (8) видно, что полоса пропускания $\Pi_{\text{ОФЭП}}$ обратно пропорциональна постоянной времени τ_d ОФЭП.

Используя соотношения (5), преобразуем (4) к виду

$$Pr_{\text{VAL}} = (1 + \bar{n}) \exp(-\bar{n}) \rightarrow \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{n_1=0}^n \frac{1}{n} \cdot \frac{\bar{n}^n}{n!} \cdot \exp(-\bar{n}) \cdot [1 - (n_1 - 1)\alpha]^{n_1} \cdot [1 - (n - n_1 - 1)\alpha]^{n - n_1}. \quad (9)$$

На рис. 2 сплошными линиями представлены результаты расчёта по формуле (9) достоверности Pr_{val} от среднего числа сгенерированных ФЭ в диапазоне до $\bar{n} = 10$ для двухканальной системы при $\alpha = 0,005$; $0,02$ и $0,065$. Здесь же штриховыми линиями представлены аналогичные зависимости для одноканальной системы при тех же параметрах, рассчитанные по формуле (1).

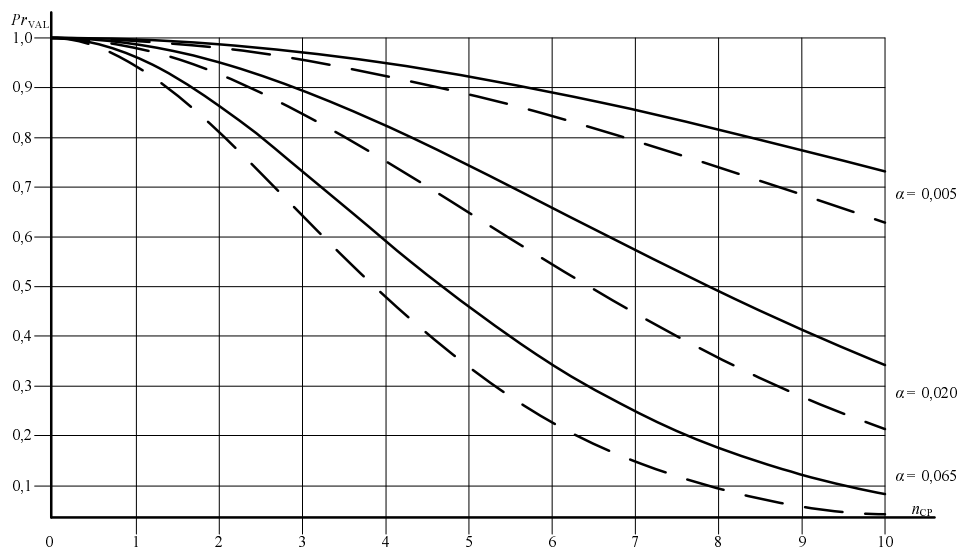


Рис. 2. Зависимости достоверности регистрации от среднего числа сгенерированных ФЭ

Графики на рис. 2 позволяют оценить выигрыш при переходе от одноканальной к двухканальной оптической системе. Действительно, при $\alpha = 0,065$ и среднем числе сгенерированных ФЭ $\bar{n} = 2$ выигрыш в достоверности оценивается в 6,8 %. Однако при $\alpha = 0,065$ и $\bar{n} = 4$ выигрыш уже превышает 24 %.

Важно, что при фиксации значений среднего числа ФЭ за время измерения \bar{n} и достоверности Pr_{val} переход от одноканальной к двухканальной системе позволяет использовать фотоприемный канал с меньшим значением параметра α . Последнее эквивалентно, согласно (6)–(8), возможности применения ОФЭП с меньшей полосой пропускания $\Pi_{\text{ОФЭП}}$. Действительно, при $\bar{n} = 3$ и $Pr_{\text{val}} = 0,095$ переход от одноканальной к двухканальной системе дает снижение α на 51 %, а при $\bar{n} = 3$ и $Pr_{\text{val}} = 0,075$ – на 55 %. Последнее эквивалентно уменьшению ширины полосы пропускания ОФЭП в 1,5 раза при $\tau_{\text{ДС.мин}} = 0$.

Наконец, переход от одноканальной к двухканальной системе при фиксации значений параметра α и достоверности измерения Pr_{val} позволяет расширить диапазон регистрации ФЭ в сторону более интенсивных засветок. Так, например, при $\alpha = 0,005$ среднее число ФЭ, поток которых может быть зарегистрирован с достоверностью $Pr_{\text{val}} = 0,8$ увеличится с 6,87 до 8,43 при переходе от одноканальной к двухканальной системе. Это эквивалентно расширению динамического диапазона регистрации ФЭ на 22,7 % в сторону регистрации более интенсивных потоков ФЭ. Аналогичный результат расширения динамического диапазона на 21 % имеет место при $\alpha = 0,065$ и $Pr_{\text{val}} = 0,8$.

Таким образом, проведенные исследования доказывают, что переход от одноканальной к двухканальной оптической системе с однофотонной регистрацией гарантирует возможность снижения массы и стоимости антенного комплекса, увеличивает достоверность Pr_{val} , снижает требования к широкополосности фотоприемных каналов, расширяет динамический диапазон регистрации ФЭ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лазерная локация / Под ред. Устинова Н.Д. – М.: Машиностроение, 1984. – 272 с.
2. Шереметьев А.Г., Толпарев Р.Г. Лазерная связь. – М.: Связь, 1974. – 384 с.
3. Бычков С.И., Румянцев К.Е. Поиск и обнаружение оптических сигналов: Монография / Под ред. К.Е. Румянцева. – М.: Радио и связь. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 282 с.
4. Румянцев К.Е. Системы квантового распределения ключа: Монография. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – 264 с.
5. Каримуллин К.Р., Зуйков В.А., Самарцев В.В. Детектирование световых импульсов в режиме счета фотонов // Физ.-мат. науки. Ученые записки Казан. гос. университета. Сер. Физ.-мат. науки, 148, № 1. – Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2006. – С. 135-141.
6. Румянцев К.Е. Прием и обработка сигналов: Учебное пособие. – М.: Изд. центр "Академия", 2006. – 528 с.
7. Гальперн Д.Ю и др. Уменьшение веса оптической системы // Оптико-механическая промышленность. – 1976. – № 1.
8. Румянцев К.Е. Достоверность результатов одноэлектронной регистрации световых потоков // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1986. – Т 29, № 12. – С. 62-65.
9. Гальярди Р.М., Карп Ш. Оптическая связь: Пер. с англ. / Под ред. А.Г. Шереметьева. – М.: Связь, 1978. – 424 с.
10. Румянцев К.Е., Амплиев А.Е. Требования к двоичному счётчику для регистрации потока фотонов // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – СПб.: ЛЭТИ. – 2011. – № 5.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Д.А. Безуглов.

Румянцев Константин Евгеньевич – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: rke2004@mail.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; тел.: 88634371902; кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Амплиев Андрей Евгеньевич – e-mail: ampliev@yandex.ru; кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем; старший преподаватель.

Rumyantsev Konstantin Evgenevich – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: rke2004@mail.ru; 2, Chekhov street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371902; the department of information security of telecommunication systems; head the department; dr. of eng. sc.; professor.

Ampliev Andrey Evgenevich – e-mail: ampliev@yandex.ru; the department of information security of telecommunication systems; senior teacher.