

Раздел III. Радиотехника и связь

УДК 621.396.96

К.Б. Баматгиреева, К.Е. Румянцев**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ПОИСК ИМПУЛЬСНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ С ОДНОКАНАЛЬНОЙ РЕГИСТРАЦИЕЙ ФОТОНОВ***

Проанализирована организация поиска при установлении связи между движущимися корреспондентами для обнаружения и выделения момента появления оптического импульса. Предложен алгоритм, допускающий два срабатывания аппаратуры пространственно-временного поиска импульсного излучения в процессе наблюдения элемента разложения с одноканальной обработкой информации в режиме регистрации потока фотонов. Показано, что применение разработанного алгоритма обеспечивает снижение в 4 и более раз вероятности пропуска сигнала по сравнению с аналогом, допускающему только одно срабатывание аппаратуры поиска. При этом различия в значениях вероятности ложной тревоги не велики (3 ... 5 %). Получены аналитические выражения для расчёта вероятностных характеристик аппаратуры пространственно-временного поиска импульсного излучения с одноканальной обработкой информации. Доказан нелинейный характер изменения вероятности ложной тревоги от частоты генерации шумовых импульсов. Уменьшение в 10 раз частоты появления шумовых импульсов позволяет в 100 раз снизить вероятность ложной тревоги и, как следствие, уменьшить среднее время пространственно-временного поиска импульсных сигналов в режиме регистрации однофотонных импульсов. Исследования показывают, что для гарантии вероятности пропуска не выше 0,1 % среднее число шумовых импульсов, генерируемых за период следования оптических импульсов, не должно превышать 0,1. Для обеспечения вероятности пропуска не выше 10 % потребуется обеспечить в среднем приём свыше трёх сигнальных фотоэлектронов за длительность оптического импульса при частоте генерации шумовых импульсов в диапазоне 1 ... 5 МГц. Предлагаемый алгоритм обеспечивает расширение диапазона обнаружения импульсного сигнала в условиях воздействия фонового излучения в режиме регистрации фотонов при одноканальной обработке информации и допустимости двух срабатываний аппаратуры.

Пространственно-временной поиск; однофотонный импульс; одноканальная регистрация; сканирующий однофотонный фотоэмиссионный прибор; вероятностные характеристики.

К.В. Bamatgireeva, K.E. Rumyantsev**THE EXISTENTIAL SEARCH OF PULSED RADIATION SOURCES
WITH SINGLE-CHANNEL REGISTRATION OF THE PHOTON**

Analyzing the organizations search while engaging into the connection between the moving correspondents. Algorithm of the search has been proposed, involving up to two activations of pulsedemission equipment search in the observation of decomposition element with a single-channel data processing in the registration mode of the photon flux. It shown that the application of the algorithm reduces to four or more times the probability of passing the signal in comparison with analogue, only one search operation equipment. By this difference in the values of the probability for false alarm is not extreme (3 ... 5 %). Received analytical expressions are obtained for the quantitative relation to calculating of probability characteristics and timing of the complex existential search of pulsed radi-

* Работа выполнена на основе гос. задания Минобрнауки РФ №213.01-11/2014-9.

tion sources with single-channel data processing. It is proven that the non-linear behavior of the probability change of false alarm from the average number of noise pulses in the repetition period of the optical pulse. A decrease in the frequency of the noise pulses 10 times allows reducing the probability of false alarm 100 times and, consequently, reducing the average search time of pulse signals in registration mode of single photon pulses. Research shows that to ensure the probability of false alarm at 0.1 % above the average number of noise pulses generated during the period repetition optical pulses must not exceed 0.1. To ensure the possibility of missing no more than 10 % is required to provide an average of more than three signal reception of the photoelectrons for the duration of the optical pulse in the generation frequency noise pulses in the range of 1 ... 5 MHz. Offered algorithm of the search pulsed radiation with single channel registration of the photons, it provides range expansion of the successful pulsed signals on the background impact condition in photons registrations mode, by single channel data processing and allowance of two activations of equipment.

Existential search; single photon pulse; single-channel registration; scanning photoemissive device; probability characteristics.

Введение. Организация поиска при установлении связи между движущимися корреспондентами для обнаружения и выделения момента появления оптического импульса является необходимым условием синхронизации приёмно-передающего комплекса.

Предельные параметры фотоприёмной аппаратуры реализуются при использовании однофотонных фотоприёмников, позволяющих регистрировать преобразование фотона в фотоэлектрон (ФЭ) – первичный электрон. Вопросы применения последних в системах пространственно-временного поиска освещены в монографии [1] и статьях [2–12]. Здесь описываются методы обработки информации в аппаратуре поиска с однофотонным фотоэмиссионным прибором (ОФЭП), синтезируются алгоритмы поиска импульсного излучения, оптимизируются параметры и даётся методика проектирования аппаратуры пространственно-временного поиска источников импульсного излучения.

Следует остановиться на результатах исследований последних лет.

В [13] описан алгоритм пространственно-временного поиска импульсных сигналов в режиме одноканальной регистрации однофотонных импульсов. Установлены количественные соотношения для описания временных параметров комплекса поиска источников импульсного излучения при использовании сканирующего ОФЭП с ограниченной полосой пропускания в режиме регистрации однофотонных импульсов (ОФИ).

В [14, 15] получены соотношения для вероятностных и временных характеристик комплекса пространственно-временного поиска источников импульсного излучения при использовании сканирующего ОФЭП, обеспечивающие приемлемую погрешность инженерных расчётов. Получены выражения, устанавливающие связь вероятностей ложной тревоги и правильного обнаружения с длительностью, периодом и нестабильностью следования оптических импульсов, параметрами ОФЭП (число диодов, полоса пропускания), пороговым уровнем амплитудной дискриминации, частотой генерации ОФИ фонового излучения и импульсов темнового тока (ИТТ). Сформулированы требования к выбору значений периода и частоты следования оптических импульсов.

Область применения описанного в [13] алгоритма ограничена поиском источников импульсного излучения в условиях воздействия на фотоприёмник фонового излучения слабой интенсивности. Действительно, как показано в [14, 15], для выделения сигнала частота следования импульсов должна быть соизмерима с предельно реализуемой в настоящее время для обмена информацией между движущимися корреспондентами (порядка единиц мегагерц).

Кроме того следует остановиться и ещё на одной особенности применения описанного алгоритма. Пусть аппаратура поиска регистрирует фотоэлектрон в некоторый момент $t_1 \in [0, T_{\text{след}}]$ при обзоре пространственного элемента раз-

ложения. В случае отсутствия превышения уровня дискриминации при повторном анализе в интервале $[t_{\text{строб1}}, t_{\text{строб2}}]$ аппаратура прекращает просмотр данного элемента разложения. Следовательно, если полезное излучение принимается первоначально во временном интервале $[t_1, T_{\text{след}}]$ (или, что точнее, при завершении проверки в интервале $[t_{\text{строб2}}, 2T_{\text{след}}]$), то сигнал не будет зарегистрирован. Поэтому естественно, что для увеличения вероятности правильного обнаружения сигнала необходимо продолжить обследование до момента, кратного периоду следования оптических импульсов.

Цель исследований состоит в расширении диапазона успешного пространственно-временного поиска и обнаружения импульсных сигналов в условиях воздействия фонового излучения с расширением диапазона изменений интенсивности в режиме регистрации фотонов при одноканальной обработке информации и допустимости двух срабатываний аппаратуры.

Регистрация потока фотонов в процессе пространственно-временного поиска импульсного излучения. Принимаемое оптическое излучение преобразуется фотокаатодом ОФЭП в поток фотоэлектронов. Использование электронной умножительной (динодной) системы в ОФЭП позволяет получить отклик в виде ОФИ на каждый сгенерированный фотоэлектрон. Амплитуда ОФИ в ОФЭП значительно превышает уровень тепловых шумов нагрузки.

Форма ОФИ на выходе ОФЭП с N_d идентичными каскадами умножения (динодами) описывается гамма-функцией [16]

$$u_{\text{ОФИ}}(t) = U_{\text{ОФИм}} \times \left(\frac{t}{N_d \times t_d} \right)^{N_d} \exp\left(N_d - \frac{t}{t_d} \right),$$

где $U_{\text{ОФИм}}$ – амплитуда ОФИ.

Время пролета электронами между соседними динодами τ_d связано с полосою пропускания ОФЭП $\Pi_{\text{ОФЭП}}$ по уровню 0,707 соотношением [17] $\Pi_{\text{ОФЭП}} \cdot \tau_d = b_{\text{ОФЭП}}$. Значение коэффициента $b_{\text{ОФЭП}}$ меняется от 0,048 до 0,036 для однофотонных ФЭУ и диссекторов с числом динодов соответственно от 8 до 14.

Для ограничения подачи импульсов темнового тока с анода ОФЭП на вход последующей схемы обработки применяется амплитудная дискриминация с пороговым уровнем $U_{\text{АД}}$. Показано [18], что уровень амплитудной дискриминации

$U_{\text{АД}}$ должен выбираться в диапазоне $(0,3 \dots 0,8) \cdot U_{\text{ОФИм}}$ (или нормированный относительно амплитуды ОФИ $U_{\text{АД.н}} = U_{\text{АД}} / U_{\text{ОФИм}} = 0,3 \dots 0,8$). При этом вклад шумовых составляющих уменьшается на 70...80 %, тогда как потеря сигнала составляет 3...4 %.

Из-за возможности наложения ОФИ количество формируемых импульсов $n_{\text{АД}}$ не совпадает с числом генерируемых фотоэлектронов $n_{\text{ФЭ}}$. Кроме того, при наложении ОФИ момент появления импульса на выходе АД зависит как от числа наложившихся ОФИ, так и от моментов их появления.

Алгоритм поиска импульсного излучения. Пространственно-временной поиск с выделением временного момента прихода оптических сигналов основан на том, что на приёмном конце поискового комплекса известны длительность $T_{\text{имп}}$ и период следования $T_{\text{след}}$ оптических импульсов.

Пусть аппаратурой при обзоре пространственного элемента разложения фиксируется момент $t_{\text{АД1}} \in [0, T_{\text{след}}]$ первого превышения порогового уровня $U_{\text{АД}}$ амплитудного дискриминатора. При этом аппаратура становится нечувствительной к приёму ФЭ в интервале $t \in [t_{\text{АД1}}, t_{\text{строб11}}]$. Здесь

$$t_{\text{строб11}} = t_{\text{АД1}} - \tau_1 + T_{\text{след}} - 0,5\tau_{\text{строб}} \quad (1)$$

соответствует моменту начала действия импульса стробирования во время повторного обследования.

Время задержки между моментом срабатывания АД и моментом генерации 1-го фотоэлектрона (или ИТТ) равно

$$\tau_1 = 7 \cdot \tau_{\text{д}} + 5,8 \cdot \tau_{\text{д}} \cdot U_{\text{АД,н}} \quad (2)$$

Для исключения потери ФЭ из-за неправильной установки момента начала и окончания действия импульса стробирования при срабатывании АД от двух и более ФЭ, повторный опрос должен производиться во временном интервале $[t_{\text{строб11}}, t_{\text{строб12}}]$. Здесь

$$t_{\text{строб12}} = t_{\text{АД1}} - \tau_1 + T_{\text{след}} + 0,5\tau_{\text{строб}} \quad (3)$$

соответствует моменту окончания действия импульса стробирования во время повторного обследования.

Длительность импульса стробирования составляет

$$\tau_{\text{строб}} = 2 \cdot (\tau_{\text{имп}} + 5,8 \cdot \tau_{\text{д}} \cdot U_{\text{АД,н}} + \Delta T_{\text{след}}).$$

В формуле (4) учитывается нестабильность периода следования импульсов источника оптического излучения $\Delta T_{\text{след}}$, а также стремление времени задержки срабатывания АД по мере роста числа одновременно генерируемых фотоэлектронов к фиксированному минимальному значению.

В случае отсутствия превышения уровня дискриминации при повторном анализе в интервале $[t_{\text{строб11}}, t_{\text{строб12}}]$ аппаратура продолжает обследование временного интервала $t \in [t_{\text{строб12}}, 2T_{\text{след}}]$.

Пусть в процессе продолжения обследования пространственного элемента разложения вновь срабатывает АД в момент $t_{\text{АД2}} \in [t_{\text{строб12}}, 2T_{\text{след}}]$. Аппаратура переходит в режим ожидания, при котором она нечувствительна к приёму ФЭ и ИТТ в интервале $t \in [t_{\text{АД2}}, t_{\text{строб21}}]$, где

$$t_{\text{строб21}} = t_{\text{АД2}} - \tau_1 + T_{\text{след}} - 0,5\tau_{\text{строб}} \quad (5)$$

соответствует моменту начала стробирования.

Повторный опрос производится во время действия импульса стробирования $[t_{\text{строб21}}, t_{\text{строб22}}]$. Здесь

$$t_{\text{строб22}} = t_{\text{АД2}} - \tau_1 + T_{\text{след}} + 0,5\tau_{\text{строб}} \quad (6)$$

соответствует моменту окончания действия импульса стробирования во время повторного обследования.

Если происходит срабатывание АД, то принимается решение о приёме сигнала. В противном случае принимается решение об отсутствии сигнала и о прекращении обследования пространственного элемента разложения.

Особенности реализации алгоритма при допущении двух срабатываний аппаратуры. Проанализируем ситуации, которые могут возникать при реализации алгоритма пространственно-временного поиска, предполагающего до двух срабатываний аппаратуры пространственного поиска импульсного излучения в процессе наблюдения элемента разложения с одноканальной обработкой информации в режиме регистрации потока фотонов.

Ситуация 1. Наблюдение элемента разложения прекращается в момент $t = T_{\text{след}}$, если во временном интервале $[0, T_{\text{след}}]$ не зарегистрированы фотоны и ИТТ (рис. 1).

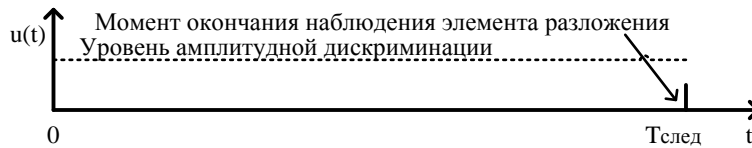


Рис. 1. Иллюстрация ситуации 1

Ситуация 2. В момент $t_{\text{АД1}} \in [0, T_{\text{след}}]$ регистрируется фотон или ИТТ. Во время проверки (стробирования ОФЭП) в интервале $[t_{\text{строб11}}, t_{\text{строб12}}]$ не фиксируется фотон и ИТТ. Аппаратура переходит в режим анализа временного интервала $[t_{\text{строб12}}, 2T_{\text{след}}]$. Наблюдение элемента разложения прекращается в момент $t = 2T_{\text{след}}$, если в интервале $[t_{\text{строб12}}, 2T_{\text{след}}]$ не регистрируются фотоны и ИТТ (рис. 2).

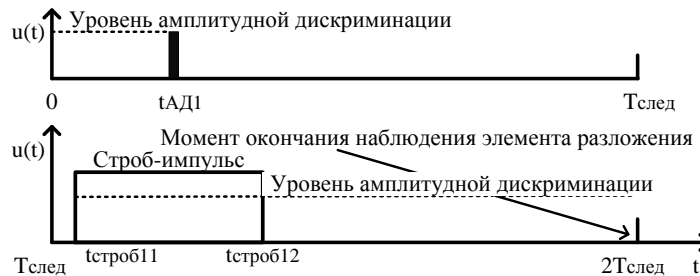


Рис. 2. Иллюстрация ситуации 2

Ситуация 3. В момент $t_{\text{АД1}} \in [0, T_{\text{след}}]$ амплитудным дискриминатором регистрируется фотон или ИТТ (рис. 3). Во время проверки причины первого срабатывания АД в интервале $[t_{\text{строб11}}, t_{\text{строб12}}]$ повторно фиксируется приём фотона или ИТТ. Наблюдение элемента разложения прекращается в момент повторного срабатывания АД $t_{\text{АД2}} \in [t_{\text{строб11}}, t_{\text{строб12}}]$. Аппаратура принимает решение об обнаружении сигнала и прекращает поиск.

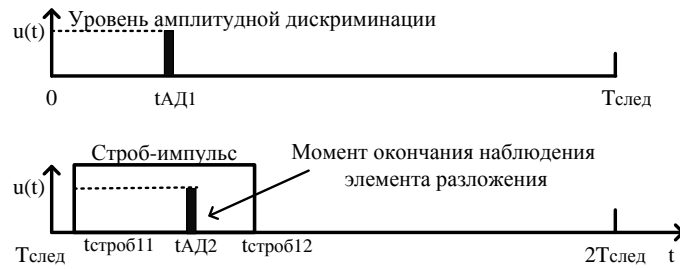


Рис. 3. Иллюстрация ситуации 3

Ситуация 4. В момент $t_{AD1} \in [0, T_{след}]$ фиксируется приём ФЭ или ИТТ (рис. 4). Проверка в интервале $[t_{строб11}, t_{строб12}]$ показывает отсутствие ФЭ и ИТТ. Аппаратура переходит к анализу временного интервала $[t_{строб12}, 2T_{след}]$. При новом срабатывании АД в момент $t_{AD2} \in [t_{строб12}, 2T_{след}]$ аппаратура вновь переходит в ждущий режим до момента $t_{строб21}$. Если во время действия импульса стробирования отсутствует срабатывание АД, то аппаратура переходит к анализу интервала $[t_{строб22}, 3T_{след}]$. Наблюдение элемента разложения прекращается в момент $t = 3T_{след}$, если во временном интервале $[t_{строб22}, 3T_{след}]$ не зарегистрировано ФЭ и ИТТ.

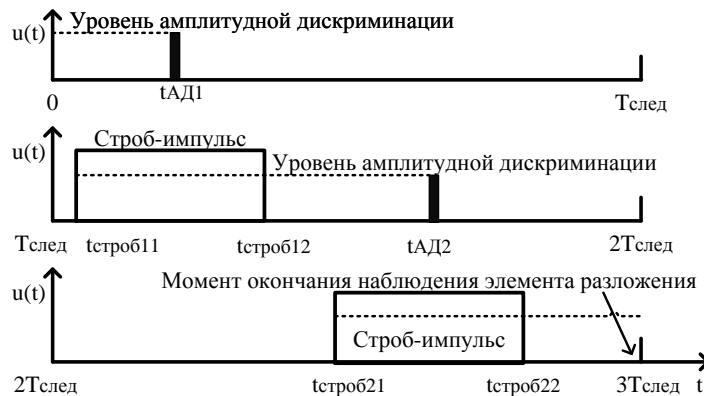


Рис. 4. Иллюстрация ситуации 4

Ситуация 5. В момент $t_{AD1} \in [0, T_{след}]$ фиксируется приём ФЭ или ИТТ. Проверка в интервале $[t_{строб11}, t_{строб12}]$ показывает отсутствие ФЭ и ИТТ. Аппаратура переходит к анализу временного интервала $[t_{строб12}, 2T_{след}]$. При новом срабатывании АД в момент $t_{AD2} \in [t_{строб12}, 2T_{след}]$ аппаратура вновь переходит в ждущий режим до момента $t_{строб21}$. Если во время действия импульса стробирования произошло третье срабатывание АД, то принимается решение об обнаружении сигнала. Временной поиск прекращается в момент $t_{AD3} \in [t_{строб12}, t_{строб22}]$ (рис. 5).

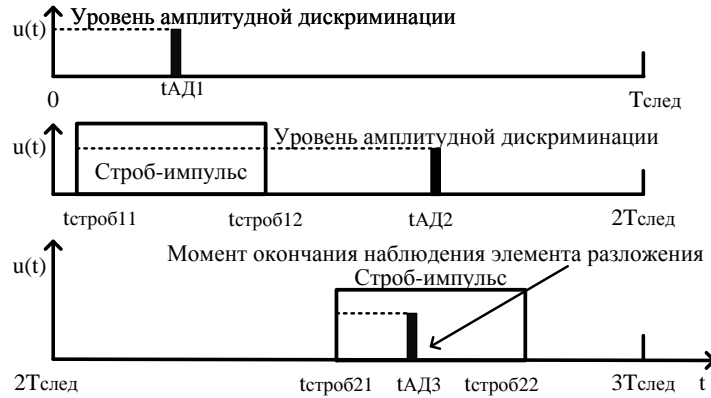


Рис. 5. Иллюстрация ситуации 5

Видно, что алгоритм предусматривает увеличение времени поиска в рамках одноканальной аппаратуры обработки информации по сравнению с алгоритмом, описанном в [13].

Вероятность ложной тревоги. Для описания статистических свойств потока ФЭ используется закон Пуассона [19, 20]. Согласно этого закона в стационарном точечном процессе вероятность наступления некоторого числа событий (приёма ФЭ) в течение заданного времени зависит только от значения интервала и не зависит от его расположения на оси времени [21].

Ложные срабатывания аппаратуры поиска импульсного излучения с одноканальной обработкой информации в режиме регистрации фоновых ФЭ и ИТТ возможны в ситуациях 3 (рис. 3) и 5 (рис. 5). Проанализируем эти ситуации применительно к анализу фонового пространственного элемента разложения при известных частотах поступления фоновых ФЭ $\xi_{фон}$ и ИТТ $\xi_{ИТТ}$.

Ситуация 3. Для ложного срабатывания аппаратуры поиска импульсного излучения должны последовательно произойти два события.

Условная вероятность регистрации одного и более фоновых ФЭ и/или ИТТ на интервале $[0, T_{след}]$ составит (первое событие)

$$P_{лтз1} = Pr\{n \geq 1 | t \in [0, T_{след}]\} = 1 - Pr\{n = 0 | t \in [0, T_{след}]\} = 1 - \exp(-\xi_{ш} T_{след}),$$

где $\xi_{ш} = \xi_{фон} + \xi_{ИТТ}$ – частота появления шумовых импульсов.

Для ложного срабатывания необходимо, чтобы произошло срабатывание АД во время проверки в интервале $[t_{строб11}, t_{строб12}]$. Условная вероятность второго события равна

$$P_{лтз2} = Pr\{n \geq 1 | t \in [t_{строб11}, t_{строб12}]\} = 1 - \exp(-\xi_{ш} \tau_{строб}).$$

Заметим, что условная вероятность ложной тревоги для ситуации 3 не зависит от случайного момента приёма первого фонового ФЭ или ИТТ на интервале $[0, T_{след}]$:

$$P_{лтз} = P_{лтз1} \cdot P_{лтз2} = [1 - \exp(-\xi_{ш} T_{след})] \cdot [1 - \exp(-\xi_{ш} \tau_{строб})]. \quad (7)$$

Ситуация 5. Для ложного срабатывания аппаратуры в рассматриваемой ситуации должны последовательно произойти 4 события.

Во-первых, как и в предшествующем случае, надо принять не менее одного фонового ФЭ и/или ИТТ в интервале $[0, T_{след}]$. Условная вероятность этого первого события равна

$$P_{лт51} = 1 - \exp(-\xi_{ш} T_{след}).$$

Во время проверки причины срабатывания АД при стробировании аппаратуры $t \in [t_{строб11}, t_{строб12}]$ не должен быть зафиксирован факт приёма фонового ФЭ и/или ИТТ. Вероятность этого второго события равна

$$P_{лт52} = Pr\{n = 0 | t \in [t_{строб11}, t_{строб12}]\} = \exp(-\xi_{ш} \tau_{строб}).$$

С момента окончания импульса стробирования $t_{строб12}$ аппарата продолжает обзор временного интервала $[t_{строб12}, 2T_{след}]$. Заметим, что момент $t_{строб12}$ в соответствии с формулой (3) определяется случайным моментом $t_{АД1}$ фиксации первого фонового ФЭ или ИТТ на временном интервале $[0, T_{след}]$.

В соответствии с ситуацией 5 аппарата поиска вновь во временном интервале $[t_{строб12}, 2T_{след}]$ должна зафиксировать факт приёма фонового ФЭ или ИТТ. Вероятность этого третьего события равна

$$\begin{aligned} P_{лт53}\{t_{АД1}\} &= Pr\{n \geq 1 | t \in [t_{строб12}; 2T_{след}]\} = \\ &= 1 - \exp(-\xi_{ш} T_{след} + 0,5\xi_{ш} \tau_{строб} - \xi_{ш} \tau_{зад1} + \xi_{ш} t_{АД1}). \end{aligned}$$

Для ложного срабатывания необходимо, чтобы произошло срабатывание АД во время проверки $[t_{строб21}, t_{строб22}]$. Условная вероятность этого 4-го события равна

$$P_{лт54} = Pr\{n \geq 1 | t \in [t_{строб21}, t_{строб22}]\} = 1 - \exp(-\xi_{ш} \tau_{строб}).$$

Заметим, что вероятность $P_{лт54}$ не зависит от момента срабатывания АД на интервале $[t_{строб12}, 2T_{след}]$.

Условная вероятность ложной тревоги при ситуации 5 составит

$$\begin{aligned} P_{лт5}\{t_{АД1}\} &= P_{лт51} \cdot P_{лт52} \cdot P_{лт53}\{t_{АД1}\} \cdot P_{лт54} \Rightarrow \\ &= [1 - \exp(-\xi_{ш} T_{след})] \cdot \exp(-\xi_{ш} \tau_{строб}) \cdot \\ &[1 - \exp(-\xi_{ш} T_{след} + 0,5\xi_{ш} \tau_{строб} - \xi_{ш} \tau_{зад1} + \xi_{ш} t_{АД1})] \cdot \\ &[1 - \exp(-\xi_{ш} \tau_{строб})]. \end{aligned} \quad (8)$$

В отличие от условной вероятности $P_{лт3}$ вероятность $P_{лт5}\{t_{АД1}\}$ зависит от случайного момента 1-го срабатывания АД $t_{АД1}$. Это потребует последующего усреднения по закону распределения случайной величины $t_{АД1}$.

Условная вероятность ложной тревоги при заданном моменте срабатывания АД $t_{АД1}$ может быть рассчитана по формуле

$$P_{лт}\{t_{АД1}\} = P_{лт3} + P_{лт5}\{t_{АД1}\}. \quad (9)$$

Введём в рассмотрение следующие обозначения:

$\bar{n}_{ш,след} = \xi_{ш} \cdot T_{след}$ – среднее число шумовых импульсов, генерируемых за период следования оптических импульсов $T_{след}$;

$\bar{n}_{ш,строб} = \xi_{ш} \cdot \tau_{строб}$ – среднее число шумовых импульсов, генерируемых за длительность импульса стробирования $\tau_{строб}$;

$\bar{n}_{ш,имп} = \xi_{ш} \cdot \tau_{имп}$ – среднее число шумовых импульсов, генерируемых за длительность оптического импульса $\tau_{имп}$.

Вероятность регистрации ложного срабатывания во время стробирования фотоприёмного канала равна

$$P_{строб} = 1 - \exp(-\bar{n}_{ш,строб}), \quad (10)$$

а вероятность срабатывания АД в интервале $[0, T_{след}]$ –

$$P_{след} = 1 - \exp(-\bar{n}_{ш,след}). \quad (11)$$

Выражение (9) с учётом соотношений (7) и (8) преобразуется к виду

$$P_{лт}\{t_{АД1}\} = P_{след}P_{строб} + \rightarrow \\ + P_{след}P_{строб}(1 - P_{строб}) \cdot \left[1 - \frac{1 - P_{след}}{\sqrt{1 - P_{строб}}} \exp(-\xi_{ш} \tau_1) \exp(\xi_{ш} t_{АД1}) \right].$$

Для получения формулы расчёта безусловной вероятности ложной тревоги $P_{лт}$ (в дальнейшем – вероятности ложной тревоги) путём усреднения $P_{лт}\{t_{АД1}\}$ по распределению случайной величины $t_{АД1}$ целесообразно преобразовать последнее выражение к виду

$$P_{лт}\{t_{АД1}\} = a_{лт} - b_{лт} \cdot \exp(\xi_{ш} t_{АД1}), \quad (12)$$

где

$$a_{лт} = P_{след}P_{строб}(2 - P_{строб}) \quad (13)$$

и

$$b_{лт} = P_{след}P_{строб}\sqrt{1 - P_{строб}} \cdot (1 - P_{след}) \cdot \exp(-\xi_{ш} \tau_1). \quad (14)$$

Для нахождения условной плотности вероятности момента срабатывания АД $t_{АД1}$ предположим, что в интервале $[0, T_{след}]$ принято ровно n фотоэлектронов. Тогда совместная плотность вероятности случайных моментов $t_{АД1} < t_{АД2} < t_{АД3} < \dots < t_{АДn} < T_{след}$, в которых происходит срабатывание АД, равна [22]

$$p(t_{АД1}, t_{АД2}, t_{АД3}, \dots, t_{АДn} | n) = \frac{n!}{(T_{след})^n} \cdot \dots$$

Последнее даёт возможность найти условную плотность вероятности момента первого срабатывания АД

$$p(t_{АД1} | n) = \int_0^{T_{след}} dt_{АД1} \int_{t_1}^{T_{след}} dt_{АД2} \dots \int_{t_{j-1}}^{T_{след}} dt_{АДj} \dots \int_{t_{n-1}}^{T_{след}} p(t_{АД1}, \dots, t_{АДn} | n) \cdot dt_{АДn} \cdot \dots$$

Исследования в [23] показали, что для гарантии вероятности ложной тревоги на выше 0,1 % среднее число шумовых импульсов, генерируемых за период следования оптических импульсов $T_{след}$, не должно превышать значения 0,1. При этом вероятность отсутствия приёма импульсов будет 90,48 %, а появление одного импульса – 9,05 %. Вероятность же приёма двух и более шумовых импульсов не превышает 0,47 %. Это позволяет рассматривать случай приёма только одного шумового импульса, причём момент его появления равновероятен $p(t_{АД1}) = 1/T_{след}$ в интервале $[0, T_{след}]$.

Осуществив интегрирование, находим

$$P_{лт} = a_{лт} - \frac{b_{лт}}{n_{ш,след}} \cdot \frac{P_{след}}{1 - P_{след}} = a_{лт} - c_{лт}. \quad (15)$$

Из формулы (15) видно, что для снижения вероятности ложной тревоги следует генерировать оптические импульсы наносекундной и пикосекундной длительности, предъявляя жесткие требования к стабильности частоты следования последних. Этот вывод согласуется с выводами работы [1].

Из (2), (4) и (15) следует, что вероятность ложной тревоги зависит от длительности $t_{имп}$ и периода следования $T_{след}$ оптического импульса, нестабильности периода $\Delta T_{след}$ оптических импульсов, параметров ОФЭП (числа диодов N_d , полосы пропускания $P_{ОФЭП}$), уровня амплитудной дискриминации $U_{АД}$, частоты генерации шумовых импульсов $\xi_{ш}$.

На рис. 6 приведены зависимости вероятности ложной тревоги $P_{лт}$ от частоты генерации шумовых импульсов $\xi_{ш}$. Расчёт проведён по формулам (2), (4), (13)–(15) при $N_d=14$; $U_{Ад.н}=0,5$; $\tau_{имп}=10$ нс; $\Delta T_{след}=0$; $\Pi_{ОФЭП}=100$ МГц и 4-х значениях периода следования $T_{след}$.

Как и следовало ожидать, с ростом частоты генерации шумовых импульсов $\xi_{ш}$ вероятность ложной тревоги растёт. Причём очевиден нелинейный закон этого изменения. Так, например, при периоде $T_{след}=200$ нс увеличение частоты генерации шумовых импульсов $\xi_{ш}$ с 500 до 1000 кГц (в 2 раза) ведёт к росту вероятности ложной тревоги в 3,94 раза с $1,09 \cdot 10^{-3}$ до $4,29 \cdot 10^{-3}$. В 3,85 раза наблюдается рост вероятности при увеличении частоты $\xi_{ш}$ с 1 до 2 МГц.

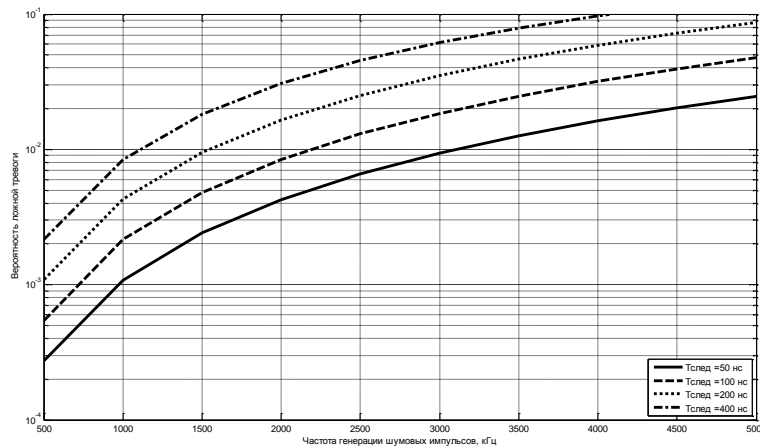


Рис. 6. Зависимости вероятности ложной тревоги от частоты генерации шумовых импульсов

Действительно, при $x \ll 1$ для экспоненциальной функции справедливо приближение $\exp(-x) \approx 1-x$. Поскольку аргумент $\bar{n}_{ш.след}$ в экспоненциальной функции формулы (11), а тем более $\bar{n}_{ш.строб}$ в формуле (10), значительно меньше 1, то можно получить приближённые выражения $P_{строб} \approx \bar{n}_{ш.строб}$ и $P_{след} \approx \bar{n}_{ш.след}$. Это позволяет преобразовать формулы (13) и (14) к виду

$$a_{лт} \approx 2\bar{n}_{ш.след} \cdot \bar{n}_{ш.строб};$$

$$b_{лт} = \bar{n}_{ш.след} \cdot \bar{n}_{ш.строб}.$$

С учётом полученных приближённых выражений формула (15) для расчёта вероятности ложной тревоги $P_{лт}$ преобразуется к виду

$$P_{лт0} \approx \bar{n}_{ш.след} \cdot \bar{n}_{ш.строб} \approx \xi_{ш}^2 T_{след} \tau_{имп}. \quad (16)$$

Выражение (16) доказывает нелинейный (квадратичный) характер изменения вероятности ложной тревоги от частоты генерации шумовых импульсов. Уменьшение в 10 раз частоты появления шумовых импульсов позволяет в 100 раз снизить вероятность ложной тревоги и, как следствие, уменьшить среднее время пространственно-временного поиска импульсных сигналов в режиме регистрации однофотонных импульсов.

Заметим, что приближённая формула (16) верна для расчёта вероятности ложной тревоги при $\overline{n_{ш,след}} \ll 1$ (нулевое приближение).

При фиксированной длительности оптических импульсов $\tau_{имп}$ рост периода следования оптического импульса $T_{след}$ ведёт к увеличению вероятности ложной тревоги. Например, при $\tau_{имп} = 10$ нс, $\xi_{ш} = 500$ кГц и $T_{след} = 200$ нс обеспечивается вероятность $P_{лт} = 0,0109$, а при $T_{след} = 400$ нс – уже 0,0217 (рост в 1,99 раза). Прямо пропорциональная связь между вероятностью $P_{лт}$ и периодом $T_{след}$ при $\overline{n_{ш,след}} \ll 1$ подтверждается соотношением (16). Однако по мере роста частоты генерации шумовых импульсов наблюдается отклонение от этой зависимости. Например, при $\tau_{имп} = 10$ нс, $\xi_{ш} = 2$ МГц и $T_{след} = 200$ нс обеспечивается вероятность $P_{лт} = 0,0165$, а при $T_{след} = 400$ нс – уже 0,0306 (рост в 1,85 раза).

Из формулы (16) следует, что для обеспечения вероятности ложной тревоги не выше допустимого уровня $P_{лт,доп}$ период следования должен превышать значение

$$T_{след} > \frac{P_{лт,доп}}{\xi_{ш}^2 \tau_{имп}}. \quad (17)$$

Отметим, что расчёт по формуле (16) даёт верхнюю оценку вероятности ложной тревоги.

При получении аналитических выражений для проведения инженерных расчётов вероятности ложной тревоги использован ряд приближений.

Приближение 1 предусматривает аппроксимацию экспоненциальной функции в выражении (10) двумя слагаемыми $P_{строб} = \overline{n_{ш,строб}} - \overline{n_{ш,строб}}^2/2$, а в формуле (11) тремя – $P_{след} = \overline{n_{ш,след}} - \overline{n_{ш,след}}^2/2 + \overline{n_{ш,след}}^3/6$. Тогда

$$a_{лт1} = P_{лт0} \left(1 - \frac{\overline{n_{ш,след}}}{2} + \frac{\overline{n_{ш,след}}^2}{6} \right) \left(1 - \frac{\overline{n_{ш,строб}}}{2} \right) \left(2 - \overline{n_{ш,строб}} + \frac{\overline{n_{ш,строб}}^2}{2} \right); \quad (18.1)$$

$$c_{лт1} = \frac{b_{лт1}}{\overline{n_{ш,след}}} \cdot \frac{P_{след}}{1 - P_{след}} = P_{лт0} \cdot \left(1 - \frac{\overline{n_{ш,след}}}{2} + \frac{\overline{n_{ш,след}}^2}{6} \right)^2 \cdot \left(1 - \frac{\overline{n_{ш,строб}}}{2} \right) \cdot \sqrt{1 - \overline{n_{ш,строб}} + \frac{\overline{n_{ш,строб}}^2}{2}} \cdot \exp(-\xi_{ш} \tau_1).$$

Приближение 2 подразумевает аппроксимацию экспоненциальной функции в (11) двумя слагаемыми – $P_{след} = \overline{n_{ш,след}} - \overline{n_{ш,след}}^2/2$. Откуда

$$a_{лт2} = P_{лт0} \left(1 - \frac{\overline{n_{ш,след}}}{2} \right) \cdot \left(1 - \frac{\overline{n_{ш,строб}}}{2} \right) \cdot \left(2 - \overline{n_{ш,строб}} + \frac{\overline{n_{ш,строб}}^2}{2} \right); \quad (18.2)$$

$$c_{лт2} = P_{лт0} \cdot \left(1 - \frac{\overline{n_{ш,след}}}{2} \right)^2 \cdot \left(1 - \frac{\overline{n_{ш,строб}}}{2} \right) \sqrt{1 - \overline{n_{ш,строб}} + \frac{\overline{n_{ш,строб}}^2}{2}} \exp(-\xi_{ш} \tau_1).$$

Приближение 3 предусматривает аппроксимацию экспоненциальной функции в (10) только одним слагаемым $P_{строб} = \overline{n_{ш,строб}}$, а в (11) двумя – $P_{след} = \overline{n_{ш,след}} - \overline{n_{ш,след}}^2/2$. Кроме того здесь принято, что $\exp(-\xi_{ш} \tau_1) \cong 1$.

$$a_{лт3} = P_{лт0} \left(1 - \frac{\overline{n_{ш,след}}}{2} \right) \cdot \left(2 - \overline{n_{ш,строб}} \right); \quad (18.3)$$

$$c_{лт3} = P_{лт0} \cdot \left(1 - \frac{\overline{n_{ш,след}}}{2} \right)^2 \sqrt{1 - \overline{n_{ш,строб}}}.$$

Приближение 4 ориентировано на выполнение условия $1 - \overline{n_{ш,строб}} \cong 1$:

$$a_{ЛТ4} = 2 \cdot P_{ЛТО} \cdot \left(1 - \frac{\overline{n_{ш,след}}}{2}\right); \quad (18.4)$$

$$c_{ЛТ4} = P_{ЛТО} \cdot \left(1 - \frac{\overline{n_{ш,след}}}{2}\right)^2.$$

В табл. 1 сведены результаты расчётов вероятности ложной тревоги по точной и приближённым формулам для двух значений периода следования оптического импульса при $N_d = 14$; $U_{АД,н} = 0,5$; $\tau_{имп} = 10$ нс; $\Delta T_{след} = 0$; $\Pi_{ОФЭП} = 100$ МГц.

Таблица 1

Результаты расчётов вероятности ложной тревоги по точной и приближённым формулам в процентах

Используемые формулы	Частота генерации шумовых импульсов, МГц									
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Период следования оптических импульсов $T_{след} = 50$ нс										
(15)	0,027	0,108	0,241	0,42	0,66	0,94	1,26	1,62	2,03	2,48
(18-1)	0,027	0,108	0,241	0,42	0,66	0,93	1,26	1,62	2,03	2,48
(18-2)	0,027	0,108	0,241	0,42	0,66	0,93	1,26	1,62	2,03	2,47
(18-3)	0,027	0,109	0,244	0,43	0,67	0,96	1,29	1,67	2,10	2,57
(18-4)	0,028	0,110	0,243	0,44	0,69	0,99	1,34	1,75	2,21	2,72
(16)	0,027	0,110	0,249	0,44	0,69	0,99	1,35	1,77	2,23	2,76
Период следования оптических импульсов $T_{след} = 200$ нс										
(15)	0,109	0,429	0,948	1,65	2,51	3,52	4,65	5,89	7,23	8,64
(18-1)	0,109	0,429	0,948	1,65	2,51	3,53	4,68	5,96	7,36	8,87
(18-2)	0,109	0,429	0,943	1,63	2,46	3,41	4,42	5,47	6,50	7,46
(18-3)	0,110	0,432	0,955	1,66	2,52	3,50	4,57	5,68	6,78	7,83
(18-4)	0,110	0,437	0,971	1,70	2,59	3,62	4,75	5,94	7,13	8,28
(16)	0,110	0,441	0,995	1,76	2,76	3,48	5,40	7,05	8,95	11,0

Сравнение результатов расчётов вероятности ложной тревоги по формулам (15) и (16) показывает хорошее совпадение при $T_{след} = 50$ нс (не хуже 3 %). Однако при $T_{след} = 200$ нс расхождение результатов достигает 57 %. Заметим, что при $T_{след} = 50$ нс среднее число шумовых импульсов, генерируемых за период следования оптических импульсов, изменяется в пределах 0,025 ... 0,25, а среднее число шумовых импульсов, генерируемых за длительность импульса стробирования, – 0,011 ... 0,11. Напротив, при $T_{след} = 200$ нс имеем $\overline{n_{ш,след}} = 0,1 \dots 1,0$, что указывает на невыполнение условия $\overline{n_{ш,след}} \ll 1$ при котором получена формула (16).

Очень хорошее совпадение с точным выражением (15) при $T_{след} \leq 200$ нс даёт приближение 1 (не хуже 2,5 %).

Наиболее же простое с точки зрения экспресс-оценки даёт приближение 4

$$P_{ЛТ4} = P_{ЛТО} \cdot \left(1 - \frac{\overline{n_{ш,след}}}{4}\right)^2. \quad (19)$$

Причём расхождение с результатами расчётов по точным формулам при $\overline{n_{ш,след}} = 0,1$ не превышает 4 % при периоде следования оптических импульсов 50 нс. Расхождение снижается до 0,9 % при $T_{след} = 400$ нс. Даже при $\overline{n_{ш,след}} = 0,2$ расхождение не превышает 7 % в диапазоне изменений периода следования оптических импульсов 50 ... 400 нс.

Проведённый анализ показывает, что расчёты по формулам (16) и (19) дают приемлемую точность. Причём расхождение между ними не превышает 9 % даже при $\overline{n_{ш.след}} = 0,6$.

В [24] получено аналитическое выражение для расчёта вероятности ложной тревоги для поисковой аппаратуры с одноканальной обработкой при допущении одного ложного срабатывания в процессе обзора пространственного элемента разложения

$$P_{лт.аналог} = P_{след} P_{строб} \quad (20)$$

На рис. 7 представлены результаты расчётов вероятности ложной тревоги по формуле (15) для предлагаемого алгоритма и по формуле (20) для аналога.

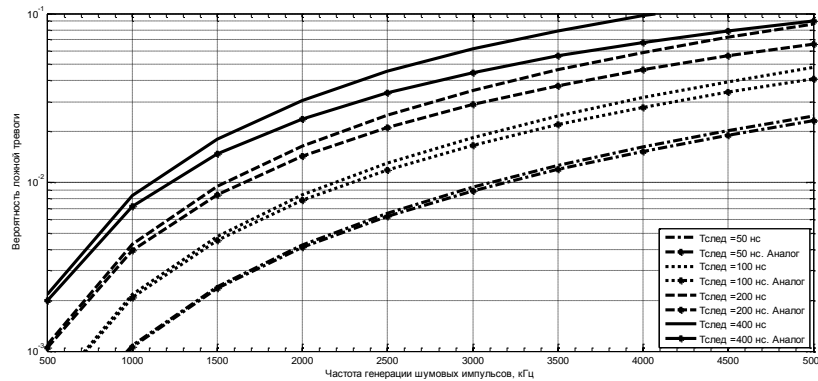


Рис. 7. Результаты расчёта вероятности ложной тревоги для предлагаемого алгоритма и аналога

Видно, что платой за допустимость в аппаратуре двух срабатываний при обзоре пространственного элемента разложения является увеличение вероятности ложной тревоги. При равных вероятностях $P_{лт}$ это эквивалентно требованию генерации передатчиком поискового комплекса световых импульсов меньшей длительности. Однако различие в значениях $P_{лт}$ не велико. Так, например, при $\overline{n_{ш.след}} = 0,1$ и $T_{след} = 50$ нс оно составляет 3,2 %, а при $T_{след} = 200$ нс – 4,8 %. При $\overline{n_{ш.след}} = 0,2$ и $T_{след} = 50$ нс различие в значениях $P_{лт}$ возрастает до 3,2 %, а при $T_{след} = 400$ нс – до 10,9 %. Незначительное различие между вероятностями ложной тревоги в описанных алгоритмах выделения оптических импульсных сигналов при $\overline{n_{ш.след}} \rightarrow 0$ объясняется тем, что с падением интенсивности фонового излучения вероятность появления более одного фотоэлектрона за период следования световых сигналов ничтожно мала.

Вероятность правильного обнаружения. Пусть в обследуемом пространственном элементе разложения присутствует полезное излучение, занимающее временные интервалы

$$[t_c + (j - 1) T_{след}, t_c + (j - 1) T_{след} + \tau_{имп}], j \geq 1.$$

Вероятность правильного обнаружения полезного излучения при пространственно-временном поиске импульсного излучения с одноканальной обработкой информации в режиме регистрации потока фоновых фотонов и ИТТ с удлинением времени наблюдения элемента разложения возможно в 2-х случаях. Проанализируем эти случаи применительно к анализу сигнального пространственного элемента разложения при известных частотах поступления фоновых ФЭ $\xi_{фон}$ и ИТТ $\xi_{ИТТ}$, а также при известном среднем числе сигнальных ФЭ за длительность оптического импульса $\overline{n_c}$.

В первом случае (рис. 8) момент появления оптического импульса в первом временном кадре удовлетворяет условию $t_c \in [0, T_{\text{след}}]$.

Условная вероятность правильного обнаружения полезного излучения

$$P_{\text{обн1}}\{t_c\} = \Pr\{n = 0 | t \in [0, t_c]\} \cdot \Pr\{n \geq 1 | t \in [t_c, t_c + \tau_{\text{имп}}]\} \rightarrow \\ \rightarrow \Pr\{n \geq 1 | t \in [t_{\text{строб11}}, t_{\text{строб12}}]\}$$

определяется тремя вероятностями:

$\Pr\{n = 0 | t \in [0, t_c]\}$ – вероятность отсутствия фоновых ФЭ и ИТТ к моменту приёма импульса полезного излучения;

$\Pr\{n \geq 1 | t \in [t_c, t_c + \tau_{\text{имп}}]\}$ – вероятность регистрации хотя бы одного ФЭ или ИТТ при анализе временного интервала, содержащего полезное излучение;

$\Pr\{n \geq 1 | t \in [t_{\text{строб11}}, t_{\text{строб12}}]\}$ – вероятность регистрации хотя бы одного фотоэлектрона или ИТТ во время действия стробирующего импульса.

Для пуассоновских потоков фотоэлектронов и ИТТ находим

$$P_{\text{обн1}}\{t_c\} = \exp(-\xi_{\text{ш}} t_c) \cdot [1 - \exp(-\bar{n}_{\text{ш.имп}} - \bar{n}_c)] \cdot [1 - \exp(-\bar{n}_{\text{ш.строб}} - \bar{n}_c)].$$

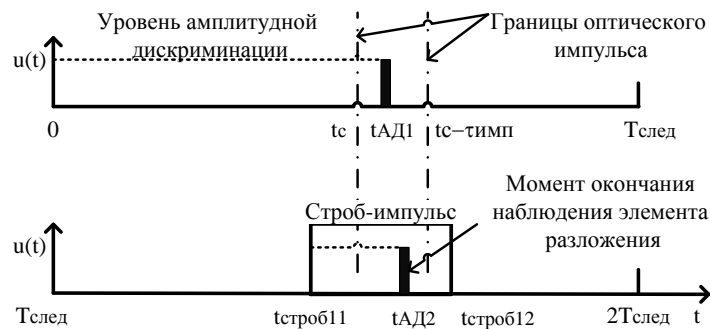


Рис. 8. Иллюстрация случая обнаружения оптического импульса во время действия первого стробирующего импульса

Заметим, что условная вероятность для первого случая зависит от случайного момента приёма импульса полезного излучения на интервале $[0, T_{\text{след}}]$.

Для второго случая (рис. 9) момент появления оптического импульса в первом временном кадре также удовлетворяет условию $t_c \in [0, T_{\text{след}}]$.

Условная вероятность правильного обнаружения полезного излучения для второго случая

$$P_{\text{обн2}}\{t_c\} = \Pr\{n \geq 1 | t \in [0, t_c]\} \cdot \Pr\{n = 0 | t \in [t_{\text{строб11}}, t_{\text{строб12}}]\} \rightarrow \\ \rightarrow \Pr\{n = 0 | t \in [t_{\text{строб12}}, t_c + T_{\text{след}}]\} \rightarrow \\ \rightarrow \Pr\{n \geq 1 | t \in [t_c + T_{\text{след}}, t_c + T_{\text{след}} + \tau_{\text{имп}}]\} \rightarrow \\ \rightarrow \Pr\{n \geq 1 | t \in [t_{\text{строб21}}, t_{\text{строб22}}]\}$$

определяется следующими вероятностями:

$\Pr\{n \geq 1 | t \in [0, t_c]\}$ – вероятность приёма фоновых ФЭ и/или ИТТ к моменту прихода импульса полезного излучения;

$\Pr\{n = 0 | t \in [t_{\text{строб11}}, t_{\text{строб12}}]\}$ – вероятность отсутствия фотоэлектронов или ИТТ во время действия импульса стробирования;

$\Pr\{n = 0 | t \in [t_{\text{строб12}}, t_c + T_{\text{след}}]\}$ – вероятность отсутствия фоновых ФЭ или ИТТ между моментами окончания действия первого строб-импульса и прихода импульса полезного излучения;

$\Pr\{n \geq 1 | t \in [t_c + T_{\text{след}}, t_c + T_{\text{след}} + \tau_{\text{имп}}]\}$ – вероятность регистрации хотя бы одного ФЭ или ИТТ при анализе временного интервала, содержащего полезное излучение;

$\Pr\{n \geq 1 | t \in [t_{\text{строб}21}, t_{\text{строб}22}]\}$ – вероятность регистрации хотя бы одного фотозлектрона или ИТТ во время действия второго стробирующего импульса.

Для пуассоновских потоков ФЭ и ИТТ находим

$$P_{\text{обн}2}\{t_c, t_{\text{АД}1}\} \Rightarrow [1 - \exp(-\xi_{\text{ш}} t_c)] \cdot \exp(-\bar{n}_{\text{ш.строб}}) \cdot \exp[-\xi_{\text{ш}}(t_c + T_{\text{след}} - t_{\text{строб}12})] \cdot \rightarrow [1 - \exp(-\bar{n}_{\text{ш.имп}} - \bar{n}_c)] \cdot [1 - \exp(-\bar{n}_{\text{ш.строб}} - \bar{n}_c)].$$

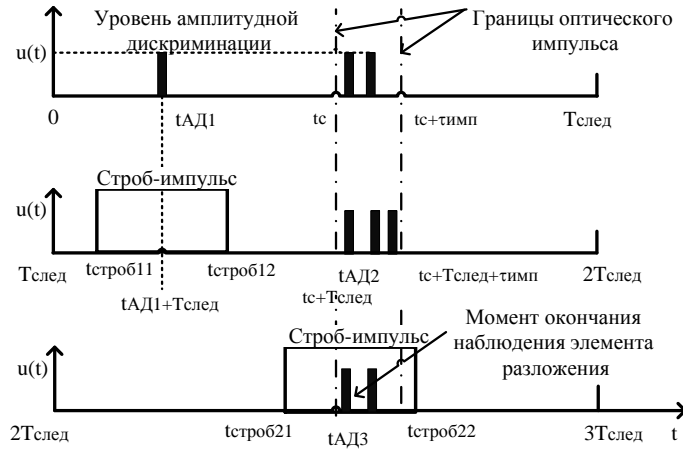


Рис. 9. Иллюстрация случая обнаружения оптического импульса во время действия второго стробирующего импульса

Результирующая условная вероятность правильного обнаружения при моменте появления оптического импульса t_c может быть рассчитана по формуле $P_{\text{обн}}\{t_c, t_{\text{АД}1}\} = P_{\text{обн}1}\{t_c\} + P_{\text{обн}2}\{t_c, t_{\text{АД}1}\}$. Заметим, что условная вероятность зависит не только от случайного момента приёма импульса полезного излучения t_c на интервале $[0, T_{\text{след}}]$, но и от момента первого срабатывания АД $t_{\text{АД}1}$.

С учётом (3) находим

$$P_{\text{обн}}\{t_c, t_{\text{АД}1}\} = A \exp(-\xi_{\text{ш}} t_c) + B [1 - \exp(-\xi_{\text{ш}} t_c)] \exp(-\xi_{\text{ш}} t_c) \exp(\xi_{\text{ш}} t_{\text{АД}1}).$$

Здесь величина $A = [1 - \exp(-\bar{n}_{\text{ш.имп}} - \bar{n}_c)] \cdot [1 - \exp(-\bar{n}_{\text{ш.строб}} - \bar{n}_c)]$ представляет вероятность регистрации хотя бы по одному импульсу во время последовательного приёма оптического импульса и действия импульса стробирования, а $B = A \cdot \exp(-\xi_{\text{ш}} \tau_1 - 0,5 \bar{n}_{\text{ш.строб}})$.

Произведя усреднение по $t_{\text{АД}1} \in [0, t_c]$, находим

$$P_{\text{обн}}\{t_c\} = \int_0^{t_c} \frac{1}{t_c} P_{\text{обн}}\{t_c, t_{\text{АД}1}\} \cdot d t_{\text{АД}1} \Rightarrow = A \cdot \exp(-\xi_{\text{ш}} t_c) + \frac{B}{\xi_{\text{ш}} t_c} + \frac{2B}{\xi_{\text{ш}} t_c} \exp(-\xi_{\text{ш}} t_c) + \frac{B}{\xi_{\text{ш}} t_c} \exp(-2\xi_{\text{ш}} t_c).$$

После интегрирования по равномерному закону распределения момента появления оптического импульса $t_c \in [0, T_{\text{след}}]$ находим безусловную вероятность правильного обнаружения

$$P_{\text{обн}} = \frac{A}{n_{\text{ш.след}}} [1 - \exp(-n_{\text{ш.след}})] + \frac{B}{n_{\text{ш.след}}} \cdot \sum_{k=2}^{\infty} \frac{(-n_{\text{ш.след}})^k}{k! \cdot k} (2^k - 2). \quad (21)$$

На рис. 10 представлены зависимости вероятности пропуска $P_{\text{пр}} = 1 - P_{\text{обн}}$ от среднего числа сигнальных ФЭ за длительность оптического импульса в 10 нс для 4-х значений периода следования оптических импульсов 50, 100, 200 и 400 нс. Частота генерации шумовых импульсов, слагаемых из ИТТ и ФЭ фонового излучения, равна 1 МГц (рис. 10,а) и 5 МГц (рис. 10,б). Расчёты по формуле (21) проведены для однофотонного диссектора с числом динодов 14, коэффициентов умножения 71 дБ, полосой пропускания 100 МГц и квантовой эффективностью фотокатода 20 %. Амплитуда формируемого ОФИ на нагрузке в 100 Ом равна 62,8 мВ при длительности 3,3 нс по уровню 0,5. Пороговый уровень амплитудной дискриминации 31,4 мВ. Время задержки между моментами приёма одиночного ФЭ и срабатывания АД составляет 3,55 нс.

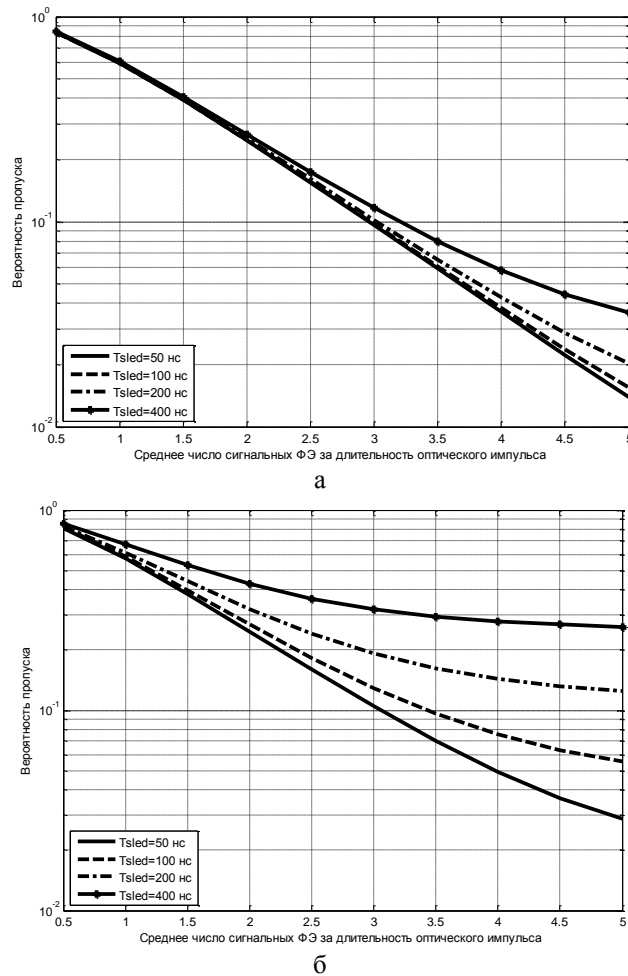


Рис. 10. Зависимости вероятности пропуска от среднего числа сигнальных ФЭ за длительность оптического импульса для частот генерации шумовых импульсов 1 МГц (а) и 5 МГц (б)

Из графиков видно, что для обеспечения вероятности пропуска не выше 10 % потребуется обеспечить в среднем приём свыше трёх сигнальных фотоэлектронов за длительность оптического импульса при $T_{\text{след}}=50$ нс и изменении частоты генерации шумовых импульсов в диапазоне $\xi_{\text{ш}}=1 \dots 5$ МГц.

Отметим, что для правильного обнаружения в обязательном порядке необходима регистрация хотя бы одного ФЭ или ИТТ во время анализа временного интервала, содержащего полезное излучение, а также во время действия стробирующего импульса. Совместная вероятность этих двух событий в предположении отсутствия фонового излучения и ИТТ равна

$$P_{\text{обн.пред}} = [1 - \exp(-\bar{n}_c)]^2. \quad (22)$$

Это нижняя оценка вероятности правильного обнаружения, поскольку всегда из-за присутствия фонового излучения и ИТТ $P_{\text{обн}} \geq P_{\text{обн.пред}} = [1 - \exp(-\bar{n}_c)]^2$. Следовательно, для обеспечения заданной вероятности $P_{\text{обн}}$ в соответствии с (22) среднее число сигнальных фотоэлектронов за длительность оптического импульса должно превышать предельный уровень:

$$\bar{n}_c \geq \bar{n}_{\text{с.пред}} = -\ln[1 - \sqrt{P_{\text{обн}}}] . \quad (23)$$

Из (23) следует, что для обеспечения $P_{\text{обн}} \geq 90\%$ необходимо в передатчике системы поиска обеспечить энергию в импульсе, гарантирующей приём в среднем не менее 2,97 ФЭ. При требовании вероятности $P_{\text{обн}} \geq 99\%$ необходимо обеспечить $\bar{n}_c \geq 5,30$.

Расчёты по формуле (21) показывают, что основным вклад в вероятность правильного обнаружения при слабой фоновой засветке даёт первое слагаемое в формуле (21). Вклад второго слагаемого в (21) соответствует 2,4 % при $T_{\text{след}}=50$ нс и $\xi_{\text{ш}}=1$ МГц. Он возрастает до 10 % с увеличением частоты генерации шумовых импульсов в 5 раз до $\xi_{\text{ш}}=5$ МГц.

Отметим, что для обеспечения $P_{\text{обн}} \geq 90\%$ в формуле (21) усреднённая вероятность отсутствия фоновых ФЭ и ИТТ в интервале, предшествующему моменту прихода оптического импульса,

$$Pr_{\text{ш}} = \frac{1 - \exp(-\bar{n}_{\text{ш.след}})}{\bar{n}_{\text{ш.след}}} \quad (24)$$

должна строго превышать 0,9. Это условие выполняется при $\bar{n}_{\text{ш.след}} < 0,2$. Последнее указывает на необходимость выбора частоты следования оптических импульсов, исходя из неравенства

$$f_{\text{след}} > 5f_{\text{ш}} . \quad (25)$$

В более общем случае выборы частоты следования оптических импульсов может производиться с учётом данных табл. 2.

Таблица 2

Усреднённая вероятность отсутствия фоновых ФЭ и ИТТ в интервале, предшествующему моменту прихода оптического импульса

$\bar{n}_{\text{ш.след}}$	0,0001	0,001	0,01	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0
$Pr_{\text{ш}}$	0,99995	0,9995	0,9950	0,9516	0,906	0,787	0,632	0,432

На рис. 11 представлены семейство зависимостей вероятности пропуска сигнала от среднего числа сигнальных ФЭ за длительность оптического импульса для предлагаемого алгоритма и аналога при $\xi_{\text{ш}}=1$ МГц (а) и 5 МГц (б).

При $\bar{n}_c=5$, $\xi_{ш}=1$ МГц и $T_{след}=100$ нс вероятность пропуска в 4 раза ниже в предлагаемом алгоритме. С уменьшением среднего числа сигнальных ФЭ за длительность оптического импульса различие в вероятностях исчезает (не превышает 1 % при $\bar{n}_c=0,5$).

Заметим, что в алгоритме-аналоге

$$P_{обн.аналог} = [1 - \exp(-\bar{n}_{ш.имп} - \bar{n}_c)] \cdot [1 - \exp(-\bar{n}_{ш.строб} - \bar{n}_c)] \rightarrow \frac{[1 - \exp(-\bar{n}_{ш.след})]}{\bar{n}_{ш.след}}$$

совпадает с первым слагаемым в формуле (21).

Из рис. 11 видно, что при фиксации вероятности правильного обнаружения внедрение предлагаемого алгоритма гарантирует расширение диапазона интенсивности шумовых импульсов 25 ... 50 %.

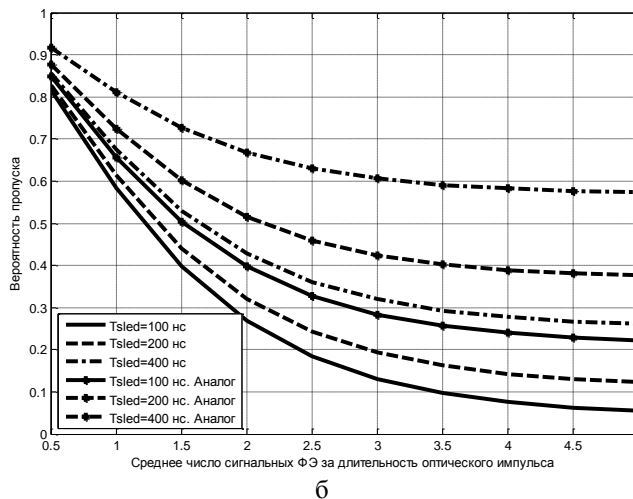
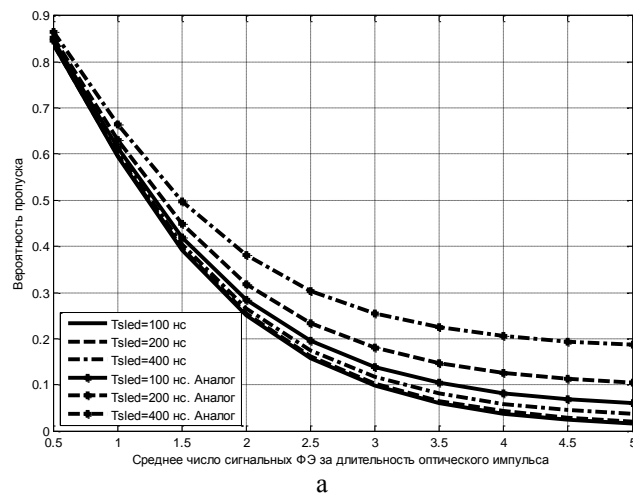


Рис. 11. Зависимости вероятности правильного обнаружения от среднего числа сигнальных ФЭ за длительность оптического импульса для предлагаемого алгоритма и аналога при $\xi_{ш}=1$ МГц (а) и 5 МГц (б)

Заключение. Предложен алгоритм, допускающий два срабатывания аппаратуры пространственного поиска импульсного излучения в процессе наблюдения элемента разложения с одноканальной обработкой информации в режиме регистрации потока фотонов. Показано, что применение разработанного алгоритма обеспечивает снижение в 4 и более раз вероятности пропуска сигнала по сравнению с аналогом, допускающему только одно срабатывание аппаратуры поиска. При этом различия в значениях вероятности ложной тревоги не велики (3–5 %).

Получены аналитические выражения (15) и (21) для расчёта вероятностных характеристик аппаратуры пространственно-временного поиска импульсного излучения с одноканальной обработкой информации. Доказан нелинейный (квадратичный) характер изменения вероятности ложной тревоги от частоты генерации шумовых импульсов. Уменьшение в 10 раз частоты появления шумовых импульсов позволяет в 100 раз снизить вероятность ложной тревоги и, как следствие, уменьшить среднее время пространственно-временного поиска импульсных сигналов в режиме регистрации однофотонных импульсов.

Исследования показывают, что для гарантии вероятности ложной тревоги на выше 0,1 % среднее число шумовых импульсов, генерируемых за период следования оптических импульсов, не должно превышать значения 0,1. Для обеспечения вероятности пропуска не выше 10 % потребуется обеспечить в среднем приём свыше трёх сигнальных фотоэлектронов за длительность оптического импульса при изменении частоты генерации шумовых импульсов в диапазоне 1... 5 МГц.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бычков С.И., Румянцев К.Е.* Поиск и обнаружение оптических сигналов: Монография / Под ред. К.Е. Румянцева. – М.: Радио и связь, 2000. – 282 с.
2. *Румянцев К.Е., Албогачиева Л.А.* Алгоритм одноканального пространственно-временного поиска импульсного излучения с оценкой временных характеристик // Современные методы и средства обработки пространственно-временных сигналов: Сборник статей XII Всероссийской научно-технической конференции (20–21 мая 2014 г.). – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2014. – С. 32-37.
3. *Румянцев К.Е., Баматгиреева К.Б.* Вероятностные характеристики алгоритма пространственно-временного поиска импульсного излучения с одноканальной обработкой информации // Современные методы и средства обработки пространственно-временных сигналов: Сборник статей XII Всероссийской научно-технической конференции (20–21 мая 2014 г.). – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2014. – С. 25-32.
4. *Албогачиева Л.А., Баматгиреева К.Б., Румянцев К.Е.* Одноканальная аппаратура поиска импульсного излучения для вхождения в связь // 21-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2014». Зеленоград, 23–25 апреля 2014 г.: Тезисы докладов. – М.: МИЭТ, 2014. – С. 181.
5. *Албогачиева Л.А., Баматгиреева К.Б.* Аппаратура поиска импульсного излучения в режиме регистрации однофотонных импульсов // Десятая ежегодная научная конференция студентов и аспирантов базовых кафедр Южного научного центра РАН: Тезисы докладов (г. Ростов-на-Дону, 14–29 апреля 2014 г.). – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2014. – С. 99-100.
6. *Румянцев К.Е., Албогачиева Л.А., Баматгиреева К.Б.* Поиск источника оптических импульсов для вхождения в связь с движущимся корреспондентом // Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Компьютерные технологии и телекоммуникации. КТиТК–2014»: Сборник материалов конференции (г. Грозный, 18–20 июня 2014 г.). – Махачкала: Изд-во АЛЕФ, 2014. – С. 78-82.
7. *Румянцев К.Е.* Регистрация факта приема многофотонного импульса в системе квантового распределения ключа на основе однофотонного фотоэлектронного умножителя // Радиотехника. – 2011. – № 11. – С. 67-69.
8. *Румянцев К.Е., Амплиев А.Е.* Требования к двоичному счетчику для регистрации потока фотонов // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2011. – Вып. 5. – С. 79-91.

9. Румянцев К.Е., Суковатый А.Н. Методы селекции шумовых одноэлектронных импульсов: Обзор // Радиотехника. – 2004. – № 6. – С. 56-61.
10. Румянцев К.Е., Хайров И.Е. Регистрация оптического излучения в поисковых системах аэронавигации и астроориентации с временной селекцией одноэлектронных импульсов // Авиакосмическое приборостроение. – 2004. – № 8. – С. 45-49.
11. Румянцев К.Е. Временной поиск импульсных сигналов одноэлектронными фотоприемниками // Известия вузов СССР. Сер. Радиоэлектроника. – 1986. – Т. 29, № 3. – С. 100-103.
12. Румянцев К.Е. Многоканальная система временного поиска импульсных сигналов одноэлектронными фотоприемниками // Известия вузов СССР. Сер. Радиоэлектроника. – 1990. – Т. 33, № 5. – С. 36-41.
13. Румянцев К.Е., Албогачиева Л.А., Баматгиреева К.Б. Алгоритм пространственно-временного поиска импульсных сигналов в режиме одноканальной регистрации однофотонных импульсов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2012. – Т. 8, № 4. – С. 3-11.
14. Румянцев К.Е., Баматгиреева К.Б. Вероятностные характеристики алгоритма пространственно-временного поиска импульсного излучения с одноканальной обработкой информации // XXI век: Итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. Серия «Технические науки. Информационные технологии». – 2014. – № 3 (20). – С. 70-77.
15. Албогачиева Л.А., Румянцев К.Е. Временные характеристики алгоритма одноканального пространственно-временного поиска импульсного излучения // XXI век: Итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. Серия «Технические науки. Информационные технологии». – 2014. – № 3 (20). – С. 62-69.
16. Ковалев В.В., Субботина Ф.М., Шубников Е.Н. Времена пролета электронов в ФЭУ // Приборы и техника эксперимента. – 1972. – № 1. – С. 158-159.
17. Румянцев К.Е. Одноэлектронные регистраторы оптических сигналов. – Таганрог: ТРТИ, 1991. – 52 с.
18. Гулаков Н.Р., Холоднырев С.В. Метод счёта фотонов в оптико-физических измерениях. – Минск: БГУ, 1989. – 256 с.
19. Шереметьев А.Г. Статистическая теория лазерной связи. – М.: Связь, 1971. – 264 с.
20. Гальярди Р.М., Карп Ш. Оптическая связь: Пер. с англ. / Под ред. А.Г. Шереметьева. – М.: Связь, 1978. – 424 с.
21. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.
22. Кокс Д., Люис П. Статистический анализ последовательностей событий: Пер. с англ. – М.: Мир, 1969. – 312 с.
23. Румянцев К.Е., Хасамбиев И.В., Албогачиева Л.А., Баматгиреева К.Б. Особенности работы аппаратуры пространственно-временного поиска импульсного излучения с одноканальной обработкой информации в ждущем режиме // Телекоммуникации. – 2015. – № 4. – С. 2-9.
24. Румянцев К.Е., Албогачиева Л.А., Баматгиреева К.Б. Требования к одноканальной аппаратуре пространственно-временного поиска импульсного излучения пропускающего в режиме регистрации однофотонных импульсов // Телекоммуникации. – 2015. – № 8. – С. 6-11.

REFERENCES

1. Bychkov S.I., Romyantsev K.E. Poisk i obnaruzhenie opticheskikh signalov: Monografiya [Search and detection of optical signals: a Monograph], Ed. by K.E. Romyantseva. Moscow: Radio i svyaz', 2000, 282 p.
2. Romyantsev K.E., Albogachieva L.A. Algoritm odnokanal'nogo prostranstvenno-vremennogo poiska impul'snogo izlucheniya s otsenkoy vremennykh kharakteristik [The single-channel algorithm of the spatial-temporal search of pulsed radiation with an estimation of time characteristics], *Sovremennye metody i sredstva obrabotki prostranstvenno-vremennykh signalov: Sbornik statey XII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (20–21 maya 2014 g.)* [Modern methods and means of the processing of spatiotemporal signals: the Gathering-nick articles XII all-Russian scientific-technical conference (20-21 may 2014)]. Penza: Privolzhskiy Dom znaniy, 2014, pp. 32-37.
3. Romyantsev K.E., Bamatgireeva K.B. Veroyatnostnye kharakteristiki algoritma prostranstvenno-vremennogo poiska impul'snogo izlucheniya s odnokanal'noy obrabotkoy informatsii [Probabilistic characteristics of the spatial-temporal search of pulsed radiation with a single-channel information processing], *Sovremennye metody i sredstva obrabotki prostranstvenno-*

- vremennykh signalov: *Sbornik statey XII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (20–21 maya 2014 g.)* [Modern methods and means of the processing of spatiotemporal signals: a Collection of articles XII all-Russian scientific-technical conference (20–21 may 2014)]. Penza: Privolzhskiy Dom znaniy, 2014, pp. 25–32.
4. *Albogachieva L.A., Bamatgireeva K.B., Rumyantsev K.E.* Odnokanal'naya apparatura poiska impul'snogo izlucheniya dlya vkhozhdeniya v svyaz' [Single-channel search instrument pulsed radiation to enter the connection], *21-ya Vserossiyskaya mezhvuzovskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya studentov aspirantov «Mikroelektronika i informatika – 2014»*. Zelenograd, 23–25 aprelya 2014 g.: *Tezisy dokladov* [21th all-Russian interuniversity scientific and technical conference of students graduate students "Microelectronics and Informatics – 2014". Zelenograd, April 23–25, 2014: Abstracts]. Moscow: MIET, 2014, pp. 181.
 5. *Albogachieva L.A., Bamatgireeva K.B.* Apparatura poiska impul'snogo izlucheniya v rezhime registratsii odnofotonnykh impul'sov [Searching for a source of optical pulses for occurrence in connection with a moving correspondent], *Desyataya ezhгодnaya nauchnaya konferentsiya studentov i aspirantov bazovykh kafedr Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN: Tezisy dokladov (g. Rostov-na-Donu, 14–29 aprelya 2014 g.)* [Tenth annual scientific conference of students and postgraduate students of basic departments of the southern scientific center of RAS: Abstracts of reports (Rostov-on-don, 14–29 April 2014)]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuNTs RAN, 2014, pp. 99–100.
 6. *Rumyantsev K.E., Albogachieva L.A., Bamatgireeva K.B.* Poisk istochnika opticheskikh impul'sov dlya vkhozhdeniya v svyaz' s dvizhushchimsya korrespondentom [Searching for a source of optical pulses for occurrence in connection with a moving correspondent], *Vserossiyskaya molodezhnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Komp'yuternye tekhnologii i telekommunikatsii. KTITK–2014»: Sbornik materialov konferentsii (g. Groznyy, 18–20 iyunya 2014 g.)* [All-Russian youth scientific-practical conference "Computer technologies and telecommunications. CTICC–2014": conference proceedings (Grozny, 18–20 June 2014)]. Makhachkala: Izd-vo ALEF, 2014, pp. 78–82.
 7. *Rumyantsev K.E.* Registratsiya fakta priema mnogofotonnogo impul'sa v sisteme kvantovogo raspredeleniya klyucha na osnove odnofotonnogo fotoelektronnogo umnozhitelya [Registration of the fact of reception of multiphoton pulse in the system of quantum key distribution based on single-photon photoelectron multiplier], *Radiotekhnika* [Radioengineering], 2011, No. 11, pp. 67–69.
 8. *Rumyantsev K.E., Ampliev A.E.* Trebovaniya k dvoichnomu schetchiku dlya registratsii potoka fotonov [Requirements to the binary counter for registering the photon flux], *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika* [Proceedings of the Russian Universities: Radioelectronics], 2011, Issue 5, pp. 79–91.
 9. *Rumyantsev K.E., Sukovatyy A.N.* Metody seleksii shumovykh odnoelektronnykh impul'sov: Obzor [Methods selection of single-electron noise pulses: a Review], *Radiotekhnika* [Radioengineering], 2004, No. 6, pp. 56–61.
 10. *Rumyantsev K.E., Khayrov I.E.* Registratsiya opticheskogo izlucheniya v poiskovykh sistemakh astronavigatsii i astroorientatsii s vremennoy seleksiyey odnoelektronnykh impul'sov [The optical radiation registration in the search systems of celestial navigation and astroorientation with interim selection of one-electron pulses], *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace Instrument-Making], 2004, No. 8, pp. 45–49.
 11. *Rumyantsev K.E.* Vremennoy poisk impul'snykh signalov odnoelektronnyimi fotopriemnikami [Temporary search pulse signals of one-electron photodetectors], *Izvestiya vuzov SSSR. Ser. Radioelektronika* [Proceedings of the Russian Universities: Radioelectronics], 1986, Vol. 29, No. 3, pp. 100–103.
 12. *Rumyantsev K.E.* Mnogokanal'naya sistema vremennogo poiska impul'snykh signalov odnoelektronnyimi fotopriemnikami [Multi-channel system temporary search pulse signals of one-electron photodetectors], *Izvestiya vuzov SSSR. Ser. Radioelektronika* [Proceedings of the Russian Universities: Radioelectronics], 1990, Vol. 33, No. 5, pp. 36–41.
 13. *Rumyantsev K.E., Albogachieva L.A., Bamatgireeva K.B.* Algoritm prostranstvenno–vremennogo poiska impul'snykh signalov v rezhime odnokanal'noy registratsii odnofotonnykh impul'sov [The algorithm of the spatial–temporal search pulse signals in single-channel mode register single-photon pulses], *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* [Electrotechnical Complexes and Control Systems], 2012, Vol. 8, No. 4, pp. 3–11.

14. Rumyantsev K.E., Bamatgireeva K.B. Veroyatnostnye kharakteristiki algoritma prostranstvenno-vremennogo poiska impul'snogo izlucheniya s odnokanal'noy obrabotkoy in-formatsii [Probabilistic characteristics of the spatial-temporal search of pulsed radiation with a single-channel information processing], *XXI vek: Itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus. Seriya «Tekhnicheskie nauki. Informatsionnye tekhnologii»* [The twenty-first century: the past and challenges of the present plus. Series "Technical Sciences. Information technology"], 2014, No. 3 (20), pp. 70-77.
15. Albogachieva L.A., Rumyantsev K.E. Vremennye kharakteristiki algoritma odnokanal'nogo prostranstvenno-vremennogo poiska impul'snogo izlucheniya [The temporal characteristics of the single-channel algorithm of the spatial-temporal search of pulsed radiation], *XXI vek: Itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus. Seriya «Tekhnicheskie nauki. Informatsionnye tekhnologii»* [The twenty-first century: the past and challenges of the present plus. Series "Technical Sciences. Information technology"], 2014, No. 3 (20), pp. 62-69.
16. Kovalev V.V., Subbotina F.M., Shubnikov E.N. Vremena proleta elektronov v FEU [The time of flight of electrons in PMT], *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Pribory i tekhnika eksperimenta], 1972, No. 1, pp. 158-159.
17. Rumyantsev K.E. Odnoelektronnye registratory opticheskikh signalov [One-electron registrars optical signals]. Taganrog: TRTI, 1991, 52 p.
18. Gulakov N.R., Kholondyrev S.V. Metod scheta fotonov v optiko-fizicheskikh izmereniyakh [The method of photon counting at optical and physical measurements]. Minsk: BGU, 1989, 256 p.
19. Sheremet'ev A.G. Statisticheskaya teoriya lazernoy svyazi [Statistical theory laser communication]. Moscow: Svyaz', 1971, 264 p.
20. Gal'yardi R.M., Karp Sh. Opticheskaya svyaz' [Optical communication]: Translated from English, ed. by A.G. Sheremet'ev. Moscow: Svyaz', 1978, 424 p.
21. Tikhonov V.I. Statisticheskaya radiotekhnika [Statistical radio engineering]. Moscow: Radio i svyaz', 1982, 624 p.
22. Koks D., Lyuis P. Statisticheskii analiz posledovatel'nostey sobytii [Statistical analysis of sequences of events]: Translated from English. Moscow: Mir, 1969, 312 p.
23. Rumyantsev K.E., Khasambiev I.V., Albogachieva L.A., Bamatgireeva K.B. Osobennosti raboty apparatury prostranstvenno-vremennogo poiska impul'snogo izlucheniya s odnokanal'noy obrabotkoy informatsii v zhdushchem rezhime [The operation of the apparatus of the spatial-temporal search of pulsed radiation with a single-channel information processing in sleep mode], *Telekommunikatsii* [Telecommunications], 2015, No. 4, pp. 2-9.
24. Rumyantsev K.E., Albogachieva L.A., Bamatgireeva K.B. Trebovaniya k odnokanal'noy apparature prostranstvenno-vremennogo poiska impul'snogo izlucheniya propuskaniya v re-zhime registratsii odnofotonnykh impul'sov [Requirements for single-channel equipment of the space-time search of pulsed radiation transmission in the mode of registration of single photon pulses], *Telekommunikatsii* [Telecommunications], 2015, No. 8, pp. 6-11.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. И.В. Хасамбиев.

Румянцев Константин Евгеньевич – Южный федеральный университет; e-mail: rke2004@mail.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; тел.: +78634371902; кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем; д.т.н. профессор, зав. кафедрой.

Баматгиреева Камила Багаудиновна – ФГБОУ ВПО «Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова»; e-mail: Puma-i@mail.ru; 364051, г. Грозный, пл. Орджоникидзе, 100; кафедра сетей связи и системы коммутации; ассистент.

Rumyantsev Konstantin Evgenievich – Southern Federal University; e-mail: rke2004@mail.ru; 2, Chekhova, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634371902; the department of information security of telecommunication; dr. of tech. sci.; professor; head of department.

Bamatgireeva Kamila Bagaudinovna – Grozny State Oil and Technological University; e-mail: Puma-i@mail.ru; 100, Ordzhonikidze sq., Grozny, 364051, Russia; the department of networks and communication; assistant.