



УДК 621.396.624

А. Е. Амплиев, К. Е. Румянцев
Южный федеральный университет (Таганрог)

Вероятностные характеристики двухканального обнаружителя с инерционным однофотонным фотоэмиссионным прибором¹

Получены аналитические выражения для расчета вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги двухканального инерционного обнаружителя импульсного оптического излучения в режиме счета фотонов, содержащего приемный оптический комплекс из двух линзовых антенн и однофотонный фотоэмиссионный прибор.

Оптическое излучение, двухканальный обнаружитель, счет фотонов, вероятность правильного обнаружения, вероятность ложной тревоги

При размещении лазерных систем связи на мобильных аппаратах актуальна проблема снижения массы аппаратуры. Так, например, стоимость вывода в космос килограмма полезного груза исчисляется тысячами долларов.

Наибольший вклад в массу лазерной системы связи вносит оптическая антенна (ОА) [1]. Согласно [2] масса линзовой антенны пропорциональна четвертой степени ее диаметра. Исходя из этого, в [3] показано, что переход от комплекса с ОА к комплексу из двух линзовых ОА позволяет в два раза снизить его массу при фиксированной площади приема.

В лазерных системах дальней связи энергия принимаемого оптического излучения настолько мала, что фотоприемный канал работает в режиме счета фотонов, разделяя регистрируя каждый акт преобразования фотона в первичный электрон (фотоэлектрон – ФЭ). Этот режим характерен и для подсистемы входения в связь с мобильными аппаратами при осуществлении пространственного (или пространственно-временного) поиска и обнаружения сигналов корреспондента.

Вопросы обнаружения слабого оптического излучения в шумах рассмотрены в ряде монографий [4]–[6] и статей [7]–[9], причем анализ процессов регистрации производился в предположении, что фотоприемный канал в состоянии различить каждый пришедший фотон. Однако инерционности однофотонного фотоэмиссионного прибора (ОФЭП) и дискретного счетчика (ДС) приводят к наложе-

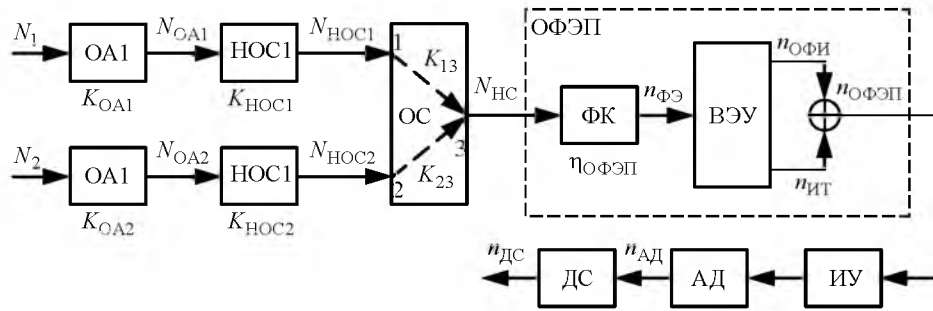
нию откликов на появление ФЭ (однофотонных импульсов – ОФИ), что сказывается на вероятностных характеристиках обнаружителя.

Целью представленного в настоящей статье исследования является сравнительный анализ эффективности систем с одно- и двухлинзовыми ОА и инерционным ОФЭП, получение аналитических выражений для расчета вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги.

Структура двухканальной системы с двумя ОА, оптическим сплиттером (ОС) и ОФЭП приведена на рисунке. Каждый оптический канал системы включает последовательно соединенные ОА и направляющую оптическую среду (НОС). В качестве НОС может быть использована зеркально-линзовая или волоконно-оптическая среда для подведения энергии от ОА к ОФЭП. Выход первого оптического канала подключен к первому порту ОС, а выход второго канала – к его второму порту. Третий, выходной, порт ОС соединен оптически с фотокатодом (ФК) ОФЭП. Генерированные ФК фотоэлектроны умножаются во вторичном электронном умножителе (ВЭУ). Выход ОФЭП через импульсный усилитель (ИУ) и амплитудный дискриминатор (АД) подключен к счетному входу ДС, выходной сигнал которого соответствует числу зарегистрированных ФЭ за время измерения.

Пусть на ОА1 и ОА2 за время измерения ($\tau_{\text{изм}}$) поступает N_1 и N_2 фотонов соответ-

¹ Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания № 213.01-11/2014-9.



венно, число которых подчинено закону Пуассона с математическими ожиданиями \bar{N}_1 и \bar{N}_2 . При коэффициентах передачи ОА1 и ОА2 K_{OA1} и K_{OA2} соответственно число фотонов, прошедших через оптические антенны ОА1 и ОА2, найдем как

$$N_{OA1} = K_{OA1}N_1; \quad N_{OA2} = K_{OA2}N_2.$$

Число фотонов, прошедших через НОС1 и НОС2 с коэффициентами передачи K_{HOC1} и K_{HOC2} соответственно:

$$N_{HOC1} = K_{HOC1}N_{OA1}; \quad N_{HOC2} = K_{HOC2}N_{OA2}.$$

Средние числа фотонов, прошедших через ОА и НОС за время измерения, определяются формулами

$$\bar{N}_{HOC1} = K_{OA1}K_{HOC1}\bar{N}_1;$$

$$\bar{N}_{HOC2} = K_{OA2}K_{HOC2}\bar{N}_2.$$

Согласно представленной на рисунке структуре обнаружителя потоки фотонов с НОС суммируются в ОС. Обозначив коэффициенты передачи оптического излучения между портами 1–3 и 2–3 ОС K_{13} и K_{23} соответственно, найдем число фотонов на порте 3 ОС:

$$N_{OC} = K_{13}N_{HOC1} + K_{23}N_{HOC2},$$

которое также распределено по закону Пуассона с математическим ожиданием

$$\bar{N}_{OC} = K_{13}\bar{N}_{HOC1} + K_{23}\bar{N}_{HOC2}.$$

В результате взаимодействия с фотокатодом ОФЭП поток фотонов преобразуется в поток ФЭ:

$$n_{ФЭ} = \eta_{ОФЭП}N_{OC},$$

где $\eta_{ОФЭП}$ – квантовая эффективность фотокатода ОФЭП.

Количество сгенерированных ВЭУ в ОФЭП ОФИ ($n_{ОФИ}$) за время измерения равно числу ФЭ ($n_{ФЭ}$), причем математические ожидания их распределений совпадают:

$$\bar{n}_{ОФИ} = \bar{n}_{ФЭ} = \eta_{ОФЭП}\bar{N}_{OC}.$$

На выходе ОФЭП во время измерения будут, наряду с ОФИ, генерироваться импульсы темно-

вого тока (ИТ) количеством $n_{ИТ}$ с математическим ожиданием $\bar{n}_{ИТ}$. Следовательно, среднее число генерируемых ОФЭП импульсов за время наблюдения составит $\bar{n}_{ОФЭП} = \bar{n}_{ОФИ} + \bar{n}_{ИТ}$.

Проанализируем ситуацию, когда площадь приема оптического излучения одинакова в одно- и двухканальной системах. Указанное условие эквивалентно предположению, что в одноканальной системе среднее число фотонов за время измерения $\bar{N} = \bar{N}_1 + \bar{N}_2$.

Сравнение процесса обработки потока фотонов в системах с одной и двумя ОА показывает, что функциональная цепочка "ОФЭП–ИУ–АД–ДС" является для них общей. Как следствие, для одноканальной системы среднее число генерируемых ОФЭП за время измерения импульсов составит

$$\bar{n}_{ОФЭП} = \eta_{ОФЭП}K_{HOC}K_{OA}\bar{N} + \bar{n}_{ИТ}. \quad (1)$$

Пусть в одноканальной системе для коэффициента передачи ОА выполняется условие

$$K_{OA} = K_{OA1} = K_{OA2},$$

а для коэффициента передачи НОС

$$K_{HOC} = K_{HOC1} = K_{HOC2}.$$

Тогда при $K_{13} = K_{23} = 1$ среднее число генерируемых ОФЭП импульсов может быть также рассчитано по (1). Это показывает, что с точностью до коэффициентов передачи K_{13} и K_{23} оптического излучения между портами 1–3 и 2–3 ОС переход от одноканальной к двухканальной системе не улучшает вероятностных характеристик обнаружителя при сохранении неизменной площади приема.

Из-за инерционности ОФЭП возможно частичное наложение генерируемых импульсов [10]. Кроме того, из-за несовершенства ДС близко расположенные импульсы могут быть неразличимы [3]. Как следствие, число подсчитанных ДС импульсов ($n_{АД}$) может не совпадать с количеством импульсов, генерируемых ОФЭП, причем $n_{ОФЭП} \geq n_{АД}$.

В [10] получено аналитическое выражение для расчета условной вероятности $P\{n_{ДС} | n_{ОФЭП}\}$ регистрации $n_{ДС}$ импульсов ДС при условии генерации $n_{ОФЭП}$ импульсов ОФЭП:

$$P\{n_{ДС} | n_{ОФЭП}\} = \frac{(n_{ОФЭП} - 1)!}{(n_{ОФЭП} - n_{ДС})!(n_{ДС} - 1)!} \times \frac{n_{ОФЭП}!}{n_{ДС}!} \alpha^{n_{ОФЭП} - n_{ДС}} [1 - (n_{ОФЭП} - 1)\alpha]^{n_{ДС}},$$

где

$$\alpha = \frac{\Delta t_{ОФЭП_{кр}}}{\tau_{изм}} + \frac{\Delta t_{ДС_{кр}}}{\tau_{изм}}$$

– обобщенный параметр, причем $\Delta t_{ОФЭП_{кр}}$ – критическая величина временного разнесения моментов появления двух ФЭ, при которой отклики ОФЭП различимы АД; $\Delta t_{ДС_{кр}}$ – критический зазор между импульсами для их раздельной регистрации в ДС.

Решение об обнаружении сигнала принимается на основе сравнения числа подсчитанных в ДС за $\tau_{изм}$ электрических импульсов $n_{ДС}$ с пороговым уровнем $n_{пор}$ в соответствии с решающим правилом:

- наличие сигнала: $n_{ДС} \geq n_{пор}$;
- отсутствие сигнала: $n_{ДС} < n_{пор}$.

Пусть за длительность измерения в каналах двухканальной системы в среднем фиксируется $\bar{N}_{с1}$, $\bar{N}_{с2}$ сигнальных и $\bar{N}_{ф1}$, $\bar{N}_{ф2}$ фоновых фотонов, а в одноканальной системе регистрируется $\bar{N}_с$ и $\bar{N}_ф$ фотонов соответственно, причем $\bar{N}_{с1} = \bar{N}_{с2} = \bar{N}_с/2$ и $\bar{N}_{ф1} = \bar{N}_{ф2} = \bar{N}_ф/2$. Тогда для двухканальной системы при проверке гипотезы о наличии сигнала принимается

$$\bar{n}_{ОФЭП_c} = \eta_{ОФЭП} (K_{13}K_{НОС1}K_{ОА1} + K_{23}K_{НОС2}K_{ОА2}) (\bar{N}_с + \bar{N}_ф)/2 + n_{ИТ}.$$

Напротив, при проверке альтернативы об отсутствии сигнала

$$\bar{n}_{ОФЭП_ф} = \eta_{ОФЭП} (K_{13}K_{НОС1}K_{ОА1} + K_{23}K_{НОС2}K_{ОА2}) \bar{N}_ф/2 + n_{ИТ}.$$

Вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги (ЛТ) определяются следующим образом:

$$P_{обн} = \exp(-\bar{n}_{ОФЭП_c} - \bar{n}_{ОФЭП_фон} - \bar{n}_{ИТ}) \times \sum_{n_{ОФЭП}=n_{пор}}^{\infty} \left[\frac{(\bar{n}_{ОФЭП_c} + \bar{n}_{ОФЭП_фон} + \bar{n}_{ИТ})^{n_{ОФЭП}}}{n_{ОФЭП}!} Y_{II} \right];$$

$$P_{ЛТ} = \exp(-\bar{n}_{ОФЭП_ф} - \bar{n}_{ИТ}) \times \sum_{n_{ОФЭП}=n_{пор}}^{\infty} \left[\frac{(\bar{n}_{ОФЭП_ф} + \bar{n}_{ИТ})^{n_{ОФЭП}}}{n_{ОФЭП}!} Y_{II} \right].$$

Функция

$$Y_{II} = \sum_{n_{ДС}=n_{пор}}^{n_{ОФЭП}} P\{n_{ДС} | n_{ОФЭП}\}$$

учитывает возможность принятия решения о превышении порогового уровня $n_{ДС} \geq n_{пор}$ даже при частичном пропуске импульсов ОФЭП ДС: $n_{ДС} < n_{ОФЭП}$. Входящие в сумму члены определяют вероятности формирования выходных импульсов ДС при различных пропусках импульсов ОФЭП. Например, при $n_{пор} = 3$ и $n_{ОФЭП} = 5$ слагаемые $P\{3|5\}$, $P\{4|5\}$ и $P\{5|5\}$ определяют вероятности регистрации ДС 3, 4 и 5 импульсов при генерации ОФЭП 5 импульсов. В том случае, если $P\{3|5\} > 0$, $P\{4|5\} > 0$, решение об обнаружении сигнала может быть принято, даже если из-за инерционности ОФЭП и неидеальности ДС будут утеряны один или два из пяти импульсов.

В настоящей статье проанализирован процесс обнаружения импульсного оптического излучения двухканальным однофотонным обнаружителем с инерционным фотоэмиссионным прибором в режиме счета фотонов. Получены аналитические выражения для расчета вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги обнаружителем с двумя линзовыми ОА. Доказано, что переход от комплекса с одной ОА к комплексу с двумя ОА не ухудшает вероятностные характеристики обнаружителя с ОФЭП при сохранении неизменной площади приема, гарантируя снижение массы приемного оптического линзового комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прайт В. К. Лазерные системы связи / пер. с англ. М.: Связь, 1972. 232 с.
2. Гальперин Д. Ю., Коршунова Л. И. Уменьшение веса оптической системы // Оптико-механическая промышленность. 1976. № 1. С. 20–22.
3. Румянцев К. Е., Амплиев А. Е. Достоверность однофотонной регистрации в двухканальной оптической системе // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2012. № 4 (129). С. 74–79.
4. Гальярди Р. М., Карп Ш. Оптическая связь / пер. с англ.; под ред. А. Г. Шереметьева. М.: Связь, 1978. 424 с.
5. Бычков С. И., Румянцев К. Е. Поиск и обнаружение оптических сигналов / под ред. К. Е. Румянцева. М.: Радио и связь, 2000. 282 с.
6. Шереметьев А. Г. Статистическая теория лазерной связи. М.: Связь, 1971. 264 с.
7. Богданович В. А., Вострецов А. Г. Теория устойчивого обнаружения, различения и оценивания сигналов. М.: Физматлит, 2003. 320 с.
8. Румянцев К. Е. Методы регистрации потока однофотонных импульсов // Радиотехника. 1991. № 3. С. 75–81.
9. Румянцев К. Е., Суковатый А. Н. Методы селекции шумовых одноэлектронных импульсов: обзор // Радиотехника. 2004. № 6. С. 56–61.
10. Румянцев К. Е. Однофотонные регистраторы световых сигналов. Таганрог: Изд-во ТРТИ, 1991. 52 с.

A. E. Ampliev, K. E. Romyantsev
Southern Federal University (Taganrog)

Probabilistic Characteristics of Two-Channel Detector with Single-Photon Photoemission Inertial Device

The analytical expressions for calculation of probabilities of correct detection and false alarms are dual inertial detector of pulsed optical radiation in the photon counting mode, containing the receiving optical system of two lens antennas and single-photon photoemission device.

Optical Radiation, Two-Channel Detector, Photon Counting, Probability of Correct Detection, Probability of False Alarm
Статья поступила в редакцию 7 июня 2016 г.

УДК 621.391.832.4

Р. З. Ахметсафина
Национальный исследовательский университет
"Высшая школа экономики" (Москва)

Цифровой компенсатор нелинейных искажений громкоговорителя на инверсной модели Гаммерштейна

Предложена схема реализации цифрового линейризующего компенсатора с внутренней обратной связью для снижения коэффициента нелинейных искажений громкоговорителей, описываемых параллельной моделью Гаммерштейна.

Громкоговоритель, нелинейные искажения, линейризация, компенсатор, устройство предискажения, параллельная модель Гаммерштейна

Узлы систем передачи звукового сигнала, такие как акустические системы, усилители низкой частоты, громкоговорители, микрофоны, телефоны и др., а также каналы передачи вносят искажения в передаваемый сигнал. При нелинейной зависимости выходного сигнала от входного в спектре воспроизведенного сигнала появляются новые составляющие, отсутствующие в первоначальном сигнале. Причиной нелинейности могут являться конструктивные и технологические осо-

бенности электроакустических преобразователей и усилителей [1]. Одним из важнейших показателей качества Hi-Fi (High-Fidelity – "высокая верность" живому звуку) аудиоаппаратуры является коэффициент нелинейных искажений. Существует два пути улучшения этого показателя – конструктивно-технологический и компенсационный. Первый предполагает расширение линейного динамического диапазона всех узлов аудиосистемы, что экспоненциально увеличивает ее стоимость (а также увеличивает