УДК 621.391

В. И. Никитенок, кандидат технических наук, доцент (БГУ);
С. С. Ветохин, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой (БГТУ)

СВЕРХБЫСТРЫЙ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ДВУХКАНАЛЬНЫЙ ОБНАРУЖИТЕЛЬ СЛАБЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Рассматривается непараметрический двухканальный обнаружитель слабых оптических сигналов, основанный на тесте Вальда – Вольфовица, и его показатели качества. Обнаружитель обеспечивает постоянство условной вероятности ложной тревоги к изменениям интенсивности помех. Обосновано принятие решения об обнаружении на минимальном интервале времени, когда один из простейших пуассоновских потоков еще продолжается (отсюда термин «сверхбыстрый»). Представлена структурная схема обнаружителя.

The operation and quality indicators of a double channel nonparametric detector of weak optical signals, which is based on Wald – Wolfowitz runs test, is described. The detector provides a constant error probability under changing background intensity. The ability of decision making on signal detection within a minimized time interval is proved under still continuing simple Poisson sequences (that means just "superfast"). The structural scheme of the detector is shown.

Введение. Статистические характеристики оптических полей отличаются большим разнообразием. В то же время для решения задач в заданной обстановке достаточно использования соответствующей частной модели лазерного сигнала [1]. Для слабых оптических сигналов в следующих случаях приема допустима пуассоновская модель: общего случая для слабого оптического поля, теплового излучения, излучения одномодового лазера, отраженного лазерного излучения, отраженного лазерного излучения совместно с пуассоновским шумом.

Основная часть. В квантово-оптических средствах находят применение обнаружители предельно слабых сигналов, основанные на методе счета отдельных фотонов [2]. Метод реализуется с использованием фотоэлектронных умножителей, диссекторов и лавинных фотодиодов. Статистика фотоэлектронов повторяет при этом статистику фотонов в плоскости чувствительного слоя фотоприемника, и квантовый характер оптического сигнала проявляется в случайном количестве фотоэлектронов и в случайных моментах их появления. При этом слабый оптический сигнал на выходе детектора – это последовательность флуктуирующих по амплитуде «одноэлектронных» импульсов [2].

Оптимальное устройство обнаружения слабых оптических сигналов [3] содержит счетчик импульсов пуассоновской последовательности и пороговое устройство. Существенным недостатком его является отсутствие устойчивости условной вероятности ложной тревоги к изменениям интенсивности помех. Непараметрические обнаружители эту устойчивость обеспечивают, но предлагают сложные в реализации алгоритмы, включающие операции запоминания и упорядочения (формирования общего вариационного ряда) обрабатываемых данных [4]. Так, для формирования общего вариационного ряда при обработке двух стационарных пуассоновских потоков Π_1 и Π_2 с интенсивностями λ_1 и λ_2 требуются выборки первого и второго потоков, каждая из m импульсов; при этом измеряют величины интервалов между соседними импульсами в каждом потоке и получают составную выборку из этих элементов с экспоненциальными распределениями с параметрами λ_1 и λ_2 [5].

В рассматриваемом случае для формирования общего вариационного ряда выборки общего объема $2m$ запоминают, а затем упорядочивают по величине. Недостаток процедур очевиден – необходимость запоминания всей выборки, что исключает формирование общего вариационного ряда в реальном масштабе времени. Поэтому реализацию непараметрических тестов, основанных на использовании общего вариационного ряда, в реальном времени часто считают невозможной [4]. Однако для простейших пуассоновских потоков указанное обнаружение реализуемо в реальном времени (быстрое обнаружение) [6], так как при этом можно исключить операции запоминания и упорядочения обрабатываемых данных с сохранением высоких показателей качества.

Рассмотрим возможность применения двухвыборочного непараметрического теста Вальда – Вольфовица.

В [6] рассмотрен быстрый непараметрический двухканальный обнаружитель слабых оптических сигналов (БНО), построенный на базе этого теста со статистикой

$$S = s_1 + s_2 \tag{1}$$

и порогом решения (тест серий односторонний)

$$c = m + 1 - \sqrt{\frac{m(m-1)}{2m-1}}\Phi^{-1}(1-F), \tag{2}$$

где s_i – число серий элементов i-й выборки в общем вариационном ряду; m – количество импульсов в каждом потоке (объем выборки); $\Phi^{-1}(x)$ – функция, обратная интегралу вероятности; F – задаваемая условная вероятность ложной тревоги.

Уравнение рабочей характеристики БНО при $m \geq 20$ имеет вид [6]

$$D = \Phi \frac{(2+g)(g\sqrt{2m} - \Phi^{-1}(1-F)(2+g))}{2\sqrt{2(1+g)(1+(1+g)^2)}}, \quad (3)$$

где D – условная вероятность правильного обнаружения; g – отношение интенсивностей потока сигнала λ_c и помехи λ_0. При этом условная вероятность правильного обнаружения зависит только от задаваемой условной вероятности ложной тревоги, отношения сигнала к помехе и количества импульсов в каждом пуассоновском потоке.

Время принятия решения на обнаружение стационарной пуассоновской последовательности импульсов с сигналом в пуассоновской помехе неизвестной интенсивности определяется наибольшим значением интервала $[0,\ T_1]$ или $[0,\ T_2]$, на каждом из которых наблюдаются пуассоновские потоки m импульсов с интенсивностями λ_1 и λ_2 соответственно. В этом недостаток БНО, особенно заметный при увеличении g. Авторам удалось его устранить при сохранении показателей качества обнаружения.

Для этого предлагается построить обнаружитель на базе двухвыборочного непараметрического теста Вальда – Вольфовица, но со статистикой, вид которой отличается от (1):

$$S = s_1 + s_2 + 1 \ \text{при} \ t \in [0,\ \min(T_1,\ T_2)]. \quad (4)$$

Это основано на том, что после поступления последнего m-го импульса одного потока на интервале $[0, \min(T_1, T_2)]$ на оставшемся интервале $[\min(T_1, T_2),\ \max(T_1, T_2)]$ достоверно наблюдается хотя бы один импульс другого пуассоновского потока, т. е. имеет место только одна серия. Поэтому для вычисления теста Вальда – Вольфовица для интервалов $[0, T_1]$, $[0, T_2]$ достаточно нахождения s_1 и s_2 на минимальном интервале $[0, \min(T_1, T_2)]$ с добавлением единицы. Если учесть, что статистика (4) и порог решения (2) могут быть уменьшены на единицу, то в обнаружителе формируется значение статистики

$$S = s_1 + s_2 \ \text{при} \ t \in [0,\ \min(T_1,\ T_2)]. \quad (5)$$

Его сравнивают с порогом решения

$$c = m - \sqrt{\frac{m(m-1)}{2m-1}}\Phi^{-1}(1-F). \quad (6)$$

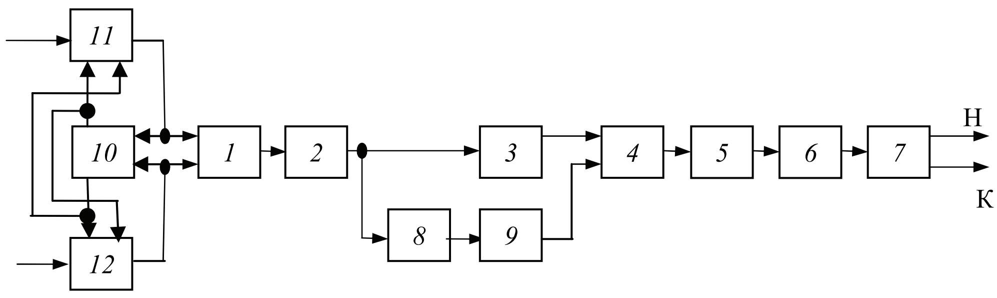
Поскольку принятие решения на обнаружение завершается на минимальном интервале времени, а один из потоков еще продолжается, то обнаружитель назван сверхбыстрым (СБНО). Его структурная схема представлена на рисунке и содержит RS-триггер *1*, дифференцирующий блок *2*, первый диод *3*, блок сложения *4*, блок нормирования *5*, накопитель импульсов *6*, пороговый блок *7*, инвертор *8*, второй диод *9*, блок сравнения *10*, первый ключевой блок *11*, второй ключевой блок *12*. СБНО работает следующим образом.

На один из входов обнаружителя поступает случайная стационарная пуассоновская последовательность Π_1 из m импульсов, обусловленная помехой, на другой – случайная стационарная последовательность Π_2 из m импульсов, обусловленная наличием смеси полезного сигнала и помехи. Первый стационарный пуассоновский поток с интенсивностью λ_1, содержащий m импульсов на интервале времени $[0, T_1]$, представляет собой результат упорядочения элементов выборки из гипотетического равномерного распределения с плотностью [6]

$$f_1(t) \cong \begin{cases} T_1^{-1} \cong \lambda_1 m^{-1}, \ 0 < t < T_1, \\ t = 0, \ t \geq T_1, \end{cases} \quad (7)$$

а второй стационарный пуассоновский поток с интенсивностью λ_2, содержащий m импульсов на интервале времени $[0, T_2]$, – результат упорядочения элементов выборки из гипотетического равномерного распределения с плотностью

$$f_2(t) \cong \begin{cases} T_2^{-1} \cong \lambda_2 m^{-1}, \ 0 < t < T_2, \\ t = 0, \ t \geq T_2. \end{cases} \quad (8)$$



Блок-схема сверхбыстрого обнаружителя

Блоки *10–12* обеспечивают прекращение процесса при поступлении на один из ключевых блоков *10* или *11* заданного количества m импульсов. Таким образом, на каждый вход RS-триггера *1* поступает стационарная пуассоновская последовательность коротких импульсов. Под их воздействием RS-триггер *1* формирует импульсы случайной длительности, фронты которых соответствуют началу или концу серий одной и второй последовательности импульсов в общей последовательности импульсов, представляющей общий вариационный ряд двух выборок из гипотетических равномерных распределений (7) и (8). Дифференцирующий блок *2* вырабатывает короткие импульсы положительной и отрицательной полярности, общее количество которых соответствует значению статистики теста суммы серий (5). Диод *3* пропускает импульсы положительной полярности, диод *9* – отрицательной полярности, которые на выходе инвертора *7* приобретают положительную полярность. Блок сложения *4* выдает последовательность импульсов положительной полярности. Их количество соответствует текущему значению суммы серий (5). Блок нормирования *5* генерирует импульсы стандартной амплитуды и длительности. Накопитель импульсов *6* суммирует по амплитуде стандартные импульсы, формируя напряжение, соответствующее текущему значению суммы серий, которое в пороговом блоке *12* сравнивается с порогом обнаружения (6). Если входное напряжение порогового блока меньше порога, то принимается решение К: «сигнал есть», в противном случае – Н: «сигнала нет». В момент времени, равный T_2, накопитель импульсов *6* обнуляется.

Формирование статистики (5) завершается при поступлении m импульсов в одной из пуассоновских последовательностей. Так как из (7) и (8) имеем $T \cong m / \lambda$, то в зависимости от того, в каком канале есть полезный сигнал, получаем

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 1 + g \ \text{ или } \ \frac{T_2}{T_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 1 + g. \qquad (9)$$

Очевидно, чем больше g, тем больше выигрыш во времени формирования статистики (5) по сравнению с (1). Например, как видно из (9), при $g = 1$ имеем двукратный выигрыш во времени принятия решения на обнаружение. При этом условные вероятности правильного обнаружения БНО и СБНО при одинаковых условиях равны между собой.

Заключение. Таким образом, в СБНО уменьшается время принятия решения на обнаружение стационарной пуассоновской последовательности импульсов с сигналом в пуассоновской помехе неизвестной интенсивности при сохранении его заданных показателей качества (условных вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги), особенно при увеличении отношения сигнала к помехе.

Литература

1. Лазерная локация / И. Н. Матвеев [и др]. М.: Машиностроение, 1984. 272 с.
2. Одноэлектронные фотоприемники / Ветохин С. С. [и др.]. М.: Энергоатомиздат, 1986. 246 с.
3. Тришенков М. А. Фотоприемные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых оптических сигналов. М.: Радио и связь, 1992. 400 с.
4. Тарасенко Ф. П. Непараметрическая статистика. Томск: ТГУ, 1976. 294 с.
5. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: учеб. для вузов. М.: Высшая школа, 2001. 575 с.
6. Никитенок В. И. Быстрые непараметрические алгоритмы обнаружения сигналов. Минск: БГУ, 2010. 131 с.

Поступила 28.02.2014