

УДК 629.7.058.7.001

В.И. Никитенок, С.С. Ветохин

**БЫСТРЫЕ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ
СЛАБЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ**

Рассматривается задача обнаружения слабых оптических сигналов для широко распространенного на практике использования в квантово-оптических средствах приемников с фотодетектированием. Представлены модели сигнала и помех для случая слабых оптических сигналов, ограничения на применение непараметрических алгоритмов их обнаружения в реальном времени (быстрые алгоритмы), структурные схема и показатели качества двухканальных обнаружителей Манна – Уитни, Вальда – Вольфовица. Дан сравнительный анализ непараметрических и квазиоптимального обнаружителей.

Ключевые слова: *слабый оптический сигнал, счетчик фотонов, непараметрические алгоритмы обнаружения, фотоприемник, ранговые тесты.*

В квантово-оптических средствах находят применение обнаружители с использованием приемников с фотодетектированием [1–7]. При этом для обнаружения предельно слабых сигналов используют метод счета отдельных оптических фотонов, возникший полвека назад, который в настоящее время хорошо разработан с теоретической и практической позиций [8]. Реализующими метод фотоприемниками могут служить фотоэлектронные умножители (ФЭУ) [9], диссекторы [10] и лавинные фотодиоды (ЛФД) [11].

Статистика фотоэлектронов повторяет статистику фотонов в плоскости чувствительного слоя фотоприемника [2, 12], и квантовый характер оптического сигнала проявляется в случайном количестве фотоэлектронов и в случайных моментах их появления. Слабый оптический сигнал на выходе детектора оптического излучения представляет собой последовательность флуктуирующих по амплитуде «одноэлектронных» [8] импульсов. Математические модели этих последовательностей кратко рассматриваются ниже. Принята пуассоновская модель.

Основная сложность практической реализации мощных непараметрических, в том числе ранговых, алгоритмов затруднена при этом необходимостью обрабатывать последовательности больших объемов [13–17]. Так, для формирования ранговой последовательности при обработке двух стационарных пуассоновских потоков m импульсов Π_1 и Π_2 с интенсивностями λ_1 и λ_2 наблюдаются выборки первого и второго потоков, представляющие собой величины интервалов между соседними импульсами в каждом потоке, и составная выборка из этих элементов, имеющих экспоненциальные распределения с параметрами λ_1 и λ_2 [18, 19].

Широко известны процедуры формирования ранговой последовательности [13, 14, 20]. В рассматриваемом случае для формирования ранговой последовательности первого стационарного пуассоновского потока Π_1 в составной выборке размера $2m$ ее запоминают, образуют $2m^2$ разностей и выполняют m суммирований. Недостаток процедур – необходимость запоминания всей выборки, что исключает формирование ранговой последовательности в реальном масштабе времени. Поэтому реализацию непараметрических тестов, основанных на рангах, в реальном времени часто считают невозможной [13].

В [20] было показано, что для простейших пуассоновских потоков ранговое двухканальное обнаружение сигналов реализуемо в реальном времени (быстрое обнаружение), так как при этом можно исключить операции запоминания и упорядочения обрабатываемых данных с сохранением высоких показателей качества. Этот результат используется и развивается далее в настоящей статье: кратко описываются модели сигнала и помех, счетчик фотонов, рассматриваются ограничения на формирование ранговой последовательности, структурная схема устройства ее формирования, оценка эффективности быстрых непараметрических алгоритмов обнаружения, непараметрические обнаружители слабых оптических сигналов, основанные на тестах Манна – Уитни, Вальда – Вольфовица, и их показатели качества. Обоснована достаточно простая практическая реализация и высокая эффективность двухканального непараметрического обнаружителя Манна – Уитни.

1. Модели сигнала и помех. Счетчик фотонов

Статистические характеристики оптических полей отличаются большим разнообразием. В общем случае аналитические выражения распределений сигнала, помех и их смеси зависят от условий эксперимента, в том числе от длительности интервала наблюдения, ширины полосы частот шумового сигнала, ширины полосы оптического фильтра, интенсивности полей, турбулентности атмосферы [2, 3]. Обычно рассматривают и используют отдельные частные модели, которые наиболее полно учитывают те или иные явления и которые для наиболее важных практических ситуаций оказываются почти адекватными. Для решения конкретных задач в заданной обстановке достаточно использование соответствующей частной модели лазерного сигнала [2].

Отметим, что для слабых оптических сигналов при определенных условиях приемлемой оказывается пуассоновская модель, в том числе для следующих случаев приема: общего случая слабого оптического поля, теплового излучения, излучения одномодового оптического квантового генератора, отраженного лазерного излучения, отраженного лазерного излучения совместно с пуассоновским шумом. Так, для многоцелевого лазерного локатора стыковки космических аппаратов характеристики обнаружения лазерного сигнала (использовался диссектор с электромагнитной фокусировкой) были рассчитаны именно в предположении пуассоновской статистики выходного сигнала [21, 22].

Отметим также, что пуассоновская модель распределения используется не только в случае слабых оптических сигналов, но и при интенсивных отражениях монохроматических сигналов от гладких движущихся целей или их элементов (при высоком разрешении) [16]. Это расширяет область применения предлагаемого подхода.

Конкретизируем регистрацию принимаемого светового излучения.

Применяемые в современных счетчиках фотонов фотоприемники [9–11] обладают квантовой эффективностью вплоть до десятков процентов, спектральным диапазоном чувствительности от ультрафиолета до ближнего инфракрасного излучения при полосе передаваемых частот до гигагерца. Прогресс в конструировании и элементной базе устройств обработки выходных сигналов фотодетектора позволяет создавать низкошумящие усилители с полосой частот более 100 МГц, дискриминаторы-формирователи с мертвым временем порядка нескольких наносекунд, что все еще уступает характеристикам быстрых ФЭУ и ЛФД, но вполне

приемлемо для задач, решаемых с применением счетчиков фотонов. Возникающие при аппаратурных перегрузках просчеты нарушают линейность устройства [23], искажают статистику отсчетов и снижают вероятность обнаружения сигнала. В частности, при обработке телевизионных изображений это ведет к снижению измеряемой контрастности [24]. В данной работе авторы ограничились случаем линейной передачи сигнала по всем цепям, что в современных счетчиках фотонов достигается в диапазоне 6 порядков изменения мощности светового потока.

Помимо фонового фотонного сигнала на характеристики обнаружителя – счетчика фотонов – оказывают влияние и фоновые процессы, происходящие в самом фотоприемнике, которые приводят к образованию на его выходе импульсов, как правило, неотличимых от импульсов, обусловленных отдельными фотонами. Среди причин «темновых» отсчетов называют [8] термоэлектронную эмиссию фотокатода и активированных диодов ФЭУ, ионизацию остаточных газов, автоэлектронную эмиссию и т. п. Статистика таких отсчетов чаще всего принимается пуассоновской. Вклад в темновой сигнал коррелированных процессов, например, оптической и ионной обратной связи, в данной работе не учитывается.

Базовая схема счетчика фотонов [7] включает фотоприемник, генерирующий одноэлектронные и темновые импульсы. Эти импульсы широкого амплитудного диапазона поступают на широкополосный усилитель, а после усиления – на амплитудный дискриминатор, порог срабатывания которого оптимизируется так, чтобы в максимальной степени отсесть темновые отсчеты, среди которых значительную часть составляют импульсы малой амплитуды, но пропустить одноэлектронные импульсы. Дискриминатор в случае срабатывания формирует на выходе стандартные импульсы, подаваемые на счетчик импульсов, который в рассматриваемой задаче заменяется на обнаружитель.

Схема телевизионного счетчика фотонов содержит дополнительные блоки, обеспечивающие развертку, оптическую или электронную, изучаемого изображения. При использовании диссектора легко достигается стандарт частоты вещательного телевидения, однако чаще используют менее быстрые пошаговые развертки.

При построении обнаружителей оптических сигналов на уровне счета отдельных фотонов в случае низких оптических фонов ведущую роль в формировании пороговых характеристик обнаружителя будут играть темновые отсчеты. В этой связи счетчики фотонов комплектуют предварительно отобранными фотоприемниками [8]. Вероятно, выходом для некоторых обнаружителей может быть применение многопороговых схем отбора [25], вводимых вместо одного дискриминатора, однако алгоритмы обработки последовательностей получаемых сигналов в настоящее время не разработаны.

В [20] доказано, что в случае формирования ранговой последовательности в двух стационарных пуассоновских потоках импульсов можно обойтись без запоминания выборок потоков. Информация для ее формирования уже содержится в потоках Π_1 , Π_2 и объединенном потоке Π_3 . При этом имеет место рассматриваемое далее ограничение.

2. Ограничение на формирование ранговой последовательности

Пусть на интервале $[0, T_1]$ задан один пуассоновский поток m точек Π_1 с интенсивностью λ_1 , а на интервале $[0, T_2]$ – другой пуассоновский поток с таким же количеством m точек Π_2 с интенсивностью λ_2 . Согласно [20], каждый из потоков

можно представить как результат упорядочения гипотетических элементов выборок из равномерных распределений с плотностями

$$f_1(t) \cong \begin{cases} 1/T_1 \cong \lambda_1/m, & 0 < t < T_1, \\ 0, & t \leq 0, \quad t \geq T_1; \end{cases} \quad (1)$$

$$f_2(t) \cong \begin{cases} 1/T_2 \cong \lambda_2/m, & 0 < t < T_2, \\ 0, & t \leq 0, \quad t \geq T_2. \end{cases} \quad (2)$$

Рассмотрим теперь расстояние между плотностями распределений, настроенное на данный опыт. Таковым может быть расстояние Бхаттачария [26]

$$B = -\ln \int \sqrt{f_1(x)f_2(x)} dx. \quad (3)$$

Вполне логично потребовать, чтобы оно для реально существующих экспоненциальных распределений и порождаемых ими равномерных распределений определялось одними и теми же параметрами.

Для экспоненциальных распределений интервалов между соседними точками пуассоновских потоков с интенсивностями λ_1 и λ_2 расстояние Бхаттачария (3) оказывается равным

$$B_3 = \ln(0,5(1+k_\lambda)/\sqrt{k_\lambda}), \quad k_\lambda = \{\lambda_2/\lambda_1, \lambda_2 > \lambda_1; \lambda_1/\lambda_2, \lambda_1 > \lambda_2\}. \quad (4)$$

Видно, что расстояние Бхаттачария (4) определяется отношением интенсивностей потоков. Как и условились, потребуем, чтобы это расстояние зависело от указанного отношения и в случае приведенных выше равномерных распределений гипотетических элементов выборок (1) и (2). Вначале положим, что пуассоновские потоки представлены различным количеством точек m_1 и m_2 . Вычисления по (3) с учетом (1) и (2) показывают, что расстояние Бхаттачария в этом случае определяется выражением (для определенности взято $T_2 \leq T_1$):

$$B_p = \ln \sqrt{m_1 \lambda_2 / (m_2 \lambda_1)}.$$

Из (5) следует, что именно при $m_1 = m_2 = m$ расстояние Бхаттачария для равномерных распределений оказывается равным

$$B_3 = \ln \sqrt{k_\lambda}$$

и зависящим только от отношения интенсивностей пуассоновских потоков.

Таким образом, из (5) и (6) следует необходимость оперирования с одинаковым количеством точек в пуассоновских потоках. Это является своеобразной «платой» за указанные выше достоинства. В различных приложениях теории проверки статистических гипотез оно имеет довольно прозрачное физическое толкование.

3. Структурная схема устройства формирования ранговой последовательности

Структурная схема устройства представлена на рис. 1. Блоки 1 и 2 формирования импульсов преобразуют соответственно входные первый и второй стационарные пуассоновские потоки m импульсов Π_1 и Π_2 в стационарные пуассоновские потоки m единичных импульсов Π^*_1 и Π^*_2 , стандартных по амплитуде и длительности. На выходе блока 3 «ИЛИ» путем взаимного наложения потоков Π^*_1 и Π^*_2 формируется совмещенный во времени стационарный пуассоновский поток единичных импульсов Π^*_3 .

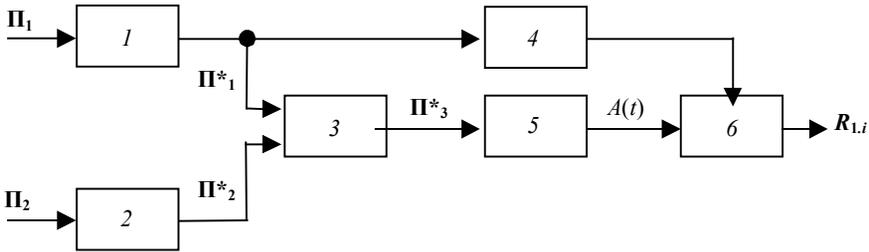


Рис. 1. Структурная схема устройства формирования ранговой последовательности: 1, 2 – блоки формирования импульсов, 3 – блок «ИЛИ», 4 – блок задержки, 5 – счетчик импульсов, 6 – ключевой блок

Первый стационарный пуассоновский поток Π^*_1 , содержащий m импульсов на интервале времени $[0, T_1]$, представляет собой результат упорядочения элементов выборки $\{t^*_{1,i}\}$, т. е. $\{t_{1,i}\} = \{t^*_{(1,i)}\}$, из равномерного распределения с плотностью (1), а второй стационарный пуассоновский поток Π^*_2 , содержащий m импульсов на интервале времени $[0, T_2]$ – результат упорядочения элементов выборки $\{t^*_{2,j}\}$, т. е. $\{t_{2,j}\} = \{t^*_{(2,j)}\}$, из равномерного распределения с плотностью (2). Тогда совмещенный поток Π^*_3 с $2m$ импульсами в моменты времени $t_{1,i}$ и $t_{2,j}$ есть общий вариационный ряд $\{t_{(1,i+2j)}\}$, составленный из элементов выборок $\{t^*_{1,i}\}$ и $\{t^*_{2,j}\}$. Поэтому номера импульсов в Π^*_3 являются рангами $R_{1,i}$ элементов первой $\{t^*_{1,i}\}$ выборки и рангами $R_{2,j}$ элементов второй $\{t^*_{2,j}\}$ выборки. Текущее значение общей ранговой последовательности формируется в реальном масштабе времени на выходе счетчика импульсов 5 в виде функции $A(t)$. Ее текущее значение равно рангам $R_{1,i}$ и $R_{2,j}$. Для формирования рангов $R_{1,i}$ на один вход ключевого блока 6 поступает $A(t)$, а на второй – импульсы потока Π^*_1 , задержанные блоком 4 задержки на величину длительности единичного импульса. Задержка обеспечивает формирование рангов после формирования $A(t)$.

То есть, ранговая последовательность для потока Π_1 формируется в реальном масштабе времени.

4. Оценка эффективности быстрых непараметрических алгоритмов обнаружения пуассоновских сигналов

Проведем оценку, используя расстояние Бхаттачария (3) и величину асимптотической относительной эффективности [13, 14].

Очевидно, чем больше расстояние Бхаттачария, тем на большую эффективность можно рассчитывать при проверке гипотез (обнаружении сигналов). Сравним это расстояние для представленных выше экспоненциальных и соответствующих им равномерных распределений

$$B_p / B_3 = \ln \sqrt{k_\lambda} / \ln(0,5(1+k_\lambda) / \sqrt{k_\lambda})$$

или
$$B_p / B_3 = \ln \sqrt{1+g} / \ln(0,5(2+g) / \sqrt{1+g}), \quad g = k_\lambda - 1,$$

где $g = \lambda_c / \lambda_0$ – отношение сигнала к шуму; λ_c, λ_0 – соответственно интенсивности сигнального и шумового потоков.

Отношение расстояний Бхаттачария (7) или (8) всегда превышает единицу. Это означает, что при одинаковых условиях предложенная процедура всегда эффективнее традиционной. Отношение расстояний (7) и (8) особенно велико при

малых отношениях интенсивностей пуассоновских потоков. Если $B_p / B_s = 4$ при $k_\lambda = 3$, то $B_p / B_s = 41$ при $k_\lambda = 1,1$. Таким образом, в рассматриваемом случае на большую эффективность непараметрических алгоритмов можно рассчитывать при использовании гипотетического равномерного распределения.

Заметим, что получена качественная оценка эффективности. Предварительную количественную оценку можно выполнить с помощью питмэновской асимптотической относительной эффективности (АОЭ) [18, 19]. Величину АОЭ определим для случая использования рангового двухвыборочного теста суммы рангов. Учтем, что при использовании предложенной процедуры формирования ранговой последовательности гипотетические элементы имеют равномерное распределение, а при традиционной – экспоненциальное. После несложных преобразований можно получить $АОЭ = 4$. Это означает, что в пределе, когда альтернатива стремится к гипотезе (случай малого отношения сигнала к шуму), предложенная процедура формирования ранговой последовательности обеспечивает в 4 раза меньший объем выборки, чем традиционная. При стремлении альтернативы к гипотезе объем выборки стремится к бесконечности и, казалось бы, по величине АОЭ трудно судить о качестве сравниваемых процедур для конечных объемов выборок. Однако для очень малых выборок часто наблюдается [13, 14] обнадеживающее совпадение асимптотических результатов с точными.

То есть, в практической реализации быстрые непараметрические алгоритмы обнаружения пуассоновских сигналов, использующие предложенную процедуру формирования ранговой последовательности, могут быть достаточно эффективны и, вместе с тем, работают в реальном масштабе времени. Ограничением на их применение является обработка стационарных пуассоновских потоков с одинаковым количеством импульсов.

Рассмотрим двухканальные непараметрические обнаружители слабых оптических сигналов, основанные на статистиках тестов Манна – Уитни и Вальда – Вольфовица, оперирующие с гипотетическими равномерными распределениями обрабатываемых данных (1) и (2). На один из входов обнаружителя поступают импульсы помехи, на другой – импульсы смеси полезного сигнала и помехи.

5. Обнаружитель Манна – Уитни

Алгоритм работы обнаружителя определяется видом статистики рангового двухвыборочного теста Манна – Уитни [15, 27]:

$$S = \sum_{j=1}^m R_j - 0,5m(m+1) = \sum_{j=1}^m R_j - \sum_{j=1}^m j = \sum_{j=1}^m (R_j - j) \quad (9)$$

и порогами решения

$$c_{1,2} = 0,5m^2 \pm m\sqrt{(2m+1)/12}\Phi^{-1}(1-F/2), \quad (10)$$

где R_j – ранг j -го импульса первого пуассоновского потока в общем вариационном ряду; m – количество импульсов в пуассоновском потоке; F – задаваемая вероятность ложной тревоги; $\Phi^{-1}(\cdot)$ – функция, обратная интегралу вероятности

$$\Phi(x) = (1/2\pi) \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt.$$

Заметим, что используемый вид статистики (9) упрощает ее аппаратную реализацию. Структурная схема обнаружителя представлена на рис. 2. Сумматор $I1$ вычисляет величину статистики (9), которая в пороговой схеме $I2$ сравнивается с порогами (10), на основании чего принимается решение о наличии (K) или отсутствии (H) сигнала в одном из каналов.

Уравнение рабочей характеристики двухпорогового рангового двухканального обнаружителя Манна – Уитни (ОМУ), оперирующего с гипотетическими равномерными распределениями, имеет вид [20]

$$D = \Phi\left\{\frac{(1+g)}{\sqrt{1+2g}} \times (\sqrt{1,5m}(1-1/(1+g)) - \Phi^{-1}(1-F/2))\right\}, \quad (11)$$

откуда

$$m = 2/3 \left(\frac{(\sqrt{1+2g} \Phi^{-1}(D)/(1+g) + \Phi^{-1}(1-F/2))/(1-1/(1+g))}{1} \right)^2, \quad (12)$$

где D – вероятность правильного обнаружения.

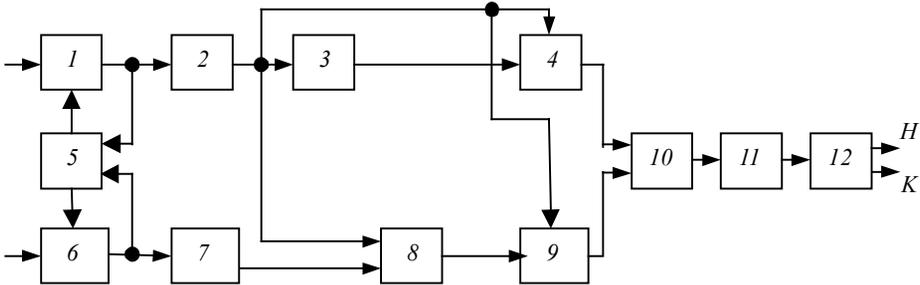


Рис. 2. Структурная схема обнаружителя Манна – Уитни (ключевые блоки 1, 4, 6 и 9; блок 5 сравнения; блоки 2, 7 нормирования; счетчики импульсов 3, 8; сумматор 11; блок разности 10; пороговый блок 12).

6. Обнаружитель Вальда – Вольфовица

Алгоритм работы обнаружителя определяется видом статистики теста Вальда – Вольфовица [28]

$$S = s_1 + s_2 \quad (13)$$

и порогом решения (тест серий односторонний)

$$c = m + 1 - \sqrt{m(m-1)/(2m-1)} \Phi^{-1}(1-F), \quad (14)$$

где s_1, s_2 – число серий элементов первой и второй выборки соответственно в общем вариационном ряду (серией называют последовательность элементов одной выборки в общем вариационном ряду, ограниченную с двух сторон элементами другой выборки). Структурная схема обнаружителя Вальда – Вольфовица (ОВВ) представлена на рис. 3.

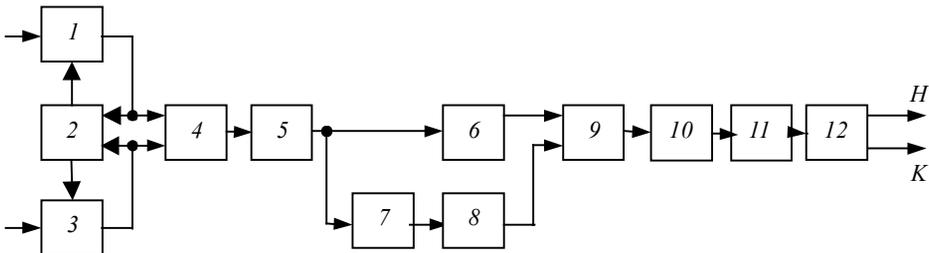


Рис. 3. Структурная схема обнаружителя Вальда – Вольфовица (ключевые блоки 1 и 3, блок сравнения 2, RS-триггер 4, дифференцирующий блок 5, диоды 6 и 8, инвертор 7, блок «ИЛИ» 9, блок нормирования 10, счетчик импульсов 11, пороговый блок 12)

На выходе счетчика импульсов 11 формируется значение суммы серий, которое в пороговом блоке 12 сравнивается с порогом обнаружения (14). Если входное напряжение порогового блока меньше порога, то принимается решение «сигнал есть» (K), в противном случае – «сигнала нет» (H). Затем накопитель 11 импульсов обнуляется. Поскольку, как указывалось, тест Вальда – Вольфовица является односторонним, то номер канала с сигналом не определяется.

По устройству ОБВ оказывается еще более простым, чем ОМУ.

Уравнение рабочей характеристики непараметрического двухканального ОБВ, оперирующего с гипотетическими равномерными распределениями, при $m \geq 20$ имеет вид [20]

$$D = \Phi\{0,5(2+g)^2 / \sqrt{2(1+g)(1+(1+g)^2)} (\sqrt{2m} g / (2+g) - \Phi^{-1}(1-F))\}, \quad (15)$$

откуда требуемое количество импульсов

$$m = 0,5((2+g)/g (\sqrt{2(1+g)(1+(1+g)^2)} \Phi^{-1}(D)/(2+g)^2 + \Phi^{-1}(1-F)))^2, \quad (16)$$

7. Сравнительный анализ эффективности обнаружителей

Сравнение обнаружителей проведем по рабочим характеристикам и значениям относительной эффективности (ОЭ):

$$\varepsilon(S_i, S_j) = m_j / m_i, \quad (17)$$

где индексы i и j относят соответствующие характеристики к сравниваемым обнаружителям, S – статистика теста, используемого в обнаружителе.

Рассмотренные непараметрические двухканальные обнаружители настроены на равномерные распределения. Практический интерес представляет сравнение их по эффективности с обнаружителями, настроенными на экспоненциальные распределения: квазиоптимальный (КОО) и Манна – Уитни (ОМУ-Э). Уравнение рабочей характеристики двухканального КОО можно представить в виде [29, 30]

$$D = \Phi\{\sqrt{2m} (\sqrt{1+g} - 1) - \sqrt{1+g} \Phi^{-1}(1-F/2)\}, \quad (18)$$

откуда
$$m = 0,25((\Phi^{-1}(D) + \sqrt{1+g} \Phi^{-1}(1-F/2)) / (\sqrt{1+g} - 1))^2. \quad (19)$$

Отметим, что при $F/(1-D) \leq 0,1$ (что обычно имеет место) сравнительный анализ практически эквивалентен сопоставлению непараметрических и оптимального обнаружителей [30].

Можно показать, что уравнение рабочей характеристики двухпорогового рангового двухканального ОМУ-Э имеет вид [20]

$$D = \Phi\{(2+g) / \sqrt{6(1+g)(6+g(6+g))/(9+g(9+2g))} \times (\sqrt{1,5m} g / (2+g) - \Phi^{-1}(1-F/2))\}, \quad (20)$$

откуда

$$m = 0,67((\sqrt{6(1+g)(6+g(6+g))/(9+g(9+2g))} \Phi^{-1}(D) + (2+g) \Phi^{-1}(1-F/2)) / g)^2, \quad (21)$$

Сравнение обнаружителей слабых оптических сигналов по рабочим характеристикам (11), (15), (18), (20) и ОЭ (17) с учетом (12), (16), (19) и (21) показывает:

1) при $D = 0,5$ ОЭ обнаружителя Манна – Уитни не зависит от F и при $g = 0,1-3,1$ составляет: 2,50–1,06 относительно ОБВ, 1,43–0,84 относительно КОО, 3,66–1,56 относительно ОМУ-Э. При $g \geq 1,4$ КОО сравнивается по эффективности с ОМУ и незначительно превосходит его;

2) при $D = 0,9$ ОЭ обнаружителя Манна – Уитни зависит от F и при $g = 0,1-3,1$ составляет:

- для $F = 10^{-4}$: 1,84–1,05 относительно ОБВ; 1,43–0,84 относительно КОО; 3,75–1,80 относительно ОМУ-Э. Здесь также при $g \geq 1,4$ КОО сравнивается по эффективности с ОМУ, незначительно превосходя его;

- для $F = 10^{-6}$: 3,12–1,38 относительно ОБВ; 2,24–1,07 относительно КОО; 5,83–2,24 относительно ОМУ-Э.

Таким образом, для обнаружения слабых оптических сигналов можно рекомендовать простой в практической реализации и эффективный обнаружитель Манна – Уитни.

Заключение

1. Для пуассоновской модели слабых оптических сигналов предложена структурная схема формирования ранговой последовательности, обеспечивающая работу мощных двухканальных непараметрических обнаружителей в реальном времени с увеличением их эффективности по сравнению с использованием традиционной процедуры вычисления рангов.

2. Разработаны структурные схемы и получены показатели качества двухканальных обнаружителей Манна – Уитни и Вальда – Вольфовица, работающих в реальном времени.

3. Наиболее эффективным является обнаружитель Манна – Уитни, работающий с гипотетическими выборками из равномерных распределений. Затем следуют квазиоптимальный обнаружитель, настроенный на экспоненциальные распределения, обнаружитель Вальда – Вольфовица и обнаружитель Манна – Уитни, работающий с выборками из экспоненциальных распределений.

4. Рекомендован простой в реализации ранговый двухканальный обнаружитель Манна – Уитни, настроенный на гипотетические равномерные распределения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шереметьев А.Г. Статистическая теория лазерной связи. М.: Связь, 1971. 264 с.
2. Лазерная локация / И. Н. Матвеев и др. М.: Машиностроение, 1984. 272 с.
3. Сигналы и помехи в лазерной локации / В. Е. Зуев и др. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.
4. Манин А.П. Основы теории оптических систем траекторных и навигационных комплексов. М.: МО СССР, 1989. 224 с.
5. Многофункциональные лидарные системы / В.И. Иванов и др. Минск.: Университетское, 1986. 286 с.
6. Трищенко М.А. Фотоприемные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых оптических сигналов. М.: Радио и связь, 1992. 400 с.
7. Ветохин С.С. Контрастность изображения биообъектов при измерениях методом счета отдельных фотонов // Труды БГТУ. Сер. IV. 2008. Вып. XVI. С. 263–265.
8. Одноэлектронные фотоприемники / С.С. Ветохин и др. М.: Энергоатомиздат, 1986. 246 с.
9. Ветохин С.С., Резников И.В. Одноэлектронные характеристики фотоумножителей для счета фотонов // Приборы и техника эксперимента. 1977. № 7. С. 57–62.
10. Ветохин С.С., Резников И.В. Диссекторы – счетчики фотонов. // Оптико-механическая пром-сть. 1980. № 8. С. 46–50.
11. Ветохин С.С. и др. Исследование лавинных МДП-фотоприемников в режиме счета фотонов // Доклады АН БССР. 1987. Т. 31. № 5. С. 141–144.
12. Марова С.Н. Обнаружение слабых сигналов в оптическом диапазоне волн // Теория и техника радиолокации: Труды МАИ. М.: Машиностроение, 1972. Вып. 207, С. 198–208.
13. Тарасенко Ф.П. Непараметрическая статистика. Томск: ТГУ, 1976. 294 с.
14. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн. 3. 1976. 286 с.
15. Гаек Я., Шидак З. Теория ранговых критериев. М.: Наука, 1971. 376 с.

16. *Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория: справ.* / Я.Д. Ширман и др. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.
17. *Коваленко И.Н., Филиппова А.А.* Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1973. 368 с.
18. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей: учеб. для вузов. М.: Высшая школа, 2001. 575 с.
19. *Ширман Я.Д., Манжос В.Н.* Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981, 416 с.
20. *Никитенок В.И.* Быстрые непараметрические алгоритмы обнаружения сигналов. Минск: БГУ, 2010. 131 с.
21. *Flom T.* Spaceborne laser radar // *Appl. Opt.* 1972. V. 11. No. 2. P. 291.
22. *Flom T., Coombes D.* Multiple target tracking with scanning laser radar // *Navigation.* 1974–1975. V. 21. No. 4. P. 298.
23. *Ташкун А.П. и др.* Световые характеристики диссектора, работающего в одноэлектронном режиме // *Приборы и техника эксперимента.* 1973. № 3. С. 258–260.
24. *Ветохин С.С.* Влияние контраста изображения на отношение сигнал/шум одноэлектронного диссектора // *Оптико-механическая промышленность.* 1978. № 6. С. 65–66.
25. *Ветохин С.С., Холондырев С.А.* Двухпороговый метод измерения сверхслабых световых потоков // *Вестник БГУ.* Сер. 1. 1986. № 1. С. 64–65.
26. *Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности* / С.А. Айвазян и др. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.
27. *Mann N.B., Whitney D.R.* One test of whether one two random variables is stochastically larger than other // *Annals of Mathematical Statistics.* 1947. No. 18. P. 50–60.
28. *Уилкс С.* Математическая статистика. М.: Наука. 1967. 632 с.
29. *Левин Б.Р.* Теоретические основы статистической радиотехники. Кн. 2. М.: Сов. радио, 1975. 392 с.
30. *Гуткин Л.С.* Теория оптимальных методов радиоприема при флюктуационных помехах. М.: Сов. радио, 1972. 448 с.

Никитенок Виктор Иванович

Белорусский государственный университет

E-mail: nikitsvi@bsu.by

Ветохин Сергей Сергеевич

Белорусский государственный технологический университет,

E-mail: serega49@mail.ru

Поступила в редакцию 5 мая 2012 г.

Nickitsionak Victor I. (Belarusian State University, Minsk), *Vetokhin Sjarhei S.* (Belarusian State Technological University, Minsk). **Fast nonparametric algorithms of weak optical signals detection.**

Keywords: weak optical signal, photon counter, nonparametric detection algorithm, photo detector, rank test.

The problem of weak optical signals detection by a photon counter, which is built with a photo detector like photomultiplier tube, dissector or avalanche photodiode, is considered. The scheme and principals of a photon counter are described. For approved model of weak optical signal as a Poisson output of a photon counter the block-scheme of a powerful double channel detector mean that provides rank sequence form and improves its efficiency in comparison with a traditional rank calculation procedure is proposed.

It is obtained that the pulse number equality in two treated Poisson series is the condition of the applicability. The block-schemes of dual-channel Mann – Whitney and Wald – Wolfowitz detectors, which operate in real time mode, are described. The quality indicators of these fast nonparametric detectors are derived. Our comparative analysis of nonparametric and quasi-optimal detectors demonstrates that the Mann – Whitney one, which operates with hypothetic retrievals from a rectangular distribution, is the most effective among them. The line is continued by quasi-optimal detector, which is adjusted for exponential distribution, Wald – Wolfowitz detector and Mann – Whitney one for exponential distribution. The advantage rises for low level signal-to-noise ratio and false alarm probability.