

М. Г. СЕРИКОВА, Е. Г. ЛЕБЕДЬКО

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ РАЙСА ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ СИГНАЛОВ В ОПТИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИИ

Рассматривается возможность применения задачи Райса для обнаружения сигналов в приложении оптической локации. Показано, что даже в случае низкого отношения порог—шум возможно качественное обнаружение при условии приема сигнала на интервале между двумя шумовыми выбросами.

**Ключевые слова:** задача Райса, выбросы случайных процессов, оптическая локация, обнаружение сигналов.

В теории случайных процессов задачей Райса называется проблема поиска распределений интервалов между нулями случайного процесса в приложении теории связи [1]. Однако со временем она расширилась до поиска распределений временных интервалов не только над ненулевым, но и над функционально заданным уровнем, а также несколькими не равными друг другу уровнями. Решение данной проблемы имеет большое прикладное значение для разных областей, среди которых океанография, распознавание речи, сейсмология, биологические системы и лазерная оптика. Важным приложением решения задачи Райса в оптической локации является обнаружение и оценка информационных параметров сигналов на фоне шумов приемно-усилительного тракта.

Известно, что при заданной средней мощности случайный процесс обладает максимальной информативностью, если имеет нормальное распределение [2]. Воздействие помехи с нормальным распределением на информацию приведет к ее частичной или даже полной потере. Следовательно, наиболее опасной является помеха, которая при заданной средней мощности имеет нормальный закон распределения.

Рассмотрим распределения длительности выбросов случайного процесса при пересечении им одного уровня и интервалов между последовательными выбросами (далее — одноуровневое пересечение) [3—5]. Решение выражается через функцию Райса, которая представляет собой условную вероятность  $Q(\tau, H)$  того, что процесс  $x(t)$  пересекает уровень  $H$  с отри-

цательной производной на интервале  $(t_0, t_0 + \tau)$  при условии, что начало выброса совпадает с точкой  $t_0$  [4]:

$$Q(\tau, H) = 1 - \int_0^\tau \tilde{d}_1(t) dt + \frac{1}{2!} \int_0^\tau \int_0^\tau \tilde{d}_2(t_1, t_2) dt_1 dt_2 - \frac{1}{3!} \int_0^\tau \int_0^\tau \int_0^\tau \tilde{d}_3(t_1, t_2, t_3) dt_1 dt_2 dt_3 + \dots =$$

$$= \sum_{s=0}^{\infty} \frac{(-1)^s}{s!} \int_0^\tau \dots \int_0^\tau \tilde{d}_s(t_1, t_2, \dots, t_s) dt_1 \dots dt_s, \quad (1)$$

где  $\tilde{d}_s(t_1, t_2, \dots, t_s)$  — совместная плотность распределения вероятности процесса  $x(t)$  и его производной при условии, что в момент времени  $t = t_0$  начался выброс (значение случайного процесса  $x(t_0) = H$ , а  $x'(t_0) > 0$ ).

При этом искомая плотность вероятности распределения интервалов  $P(\tau, H)$  между выбросами случайного процесса связана с  $Q(\tau, H)$  как

$$\int_{\tau}^{\infty} P(\tau, H) d\tau = Q(\tau, H).$$

Таким образом, искомое значение  $P(\tau, H)$  находится, согласно формуле (1), следующим образом [4]:

$$P(\tau, H) = \tilde{d}_1(\tau) - \int_0^\tau \tilde{d}_2(t, \tau) dt + \dots \quad (2)$$

Аналогичным образом могут быть получены выражения для длительности интервалов между выбросами.

Несмотря на то что использование общего выражения для плотности распределения вероятности (2) затруднено, в области малых значений длительности  $\tau$  можно ограничиться вычислением только первых двух членов ряда (2) и пренебречь теми, которые учитывают маловероятные в данном случае множественные пересечения уровня  $H$  на малом по длительности интервале  $(t_0, t_0 + \tau)$ . Исходя из определения функций  $\tilde{d}_s(t_1, t_2, \dots, t_s)$  [4, 5] получим:

$$P(\tau, H) \approx P_0(\tau, H) = \frac{1}{N(H)} \int_0^\infty dx'_0 \int_0^{-\infty} x'_0 x'_1 p_2(H, H, x'_0, x'_1) dx'_1, \quad (3)$$

где  $N$  — частота пересечения процессом уровня  $H$ .

На рис. 1 представлен результат приближенного расчета плотности распределения вероятности для интервалов между выбросами нормального случайного процесса в первом приближении, рассчитанные по выражению (3); кривая 1 —  $H/\sigma=0$ , 2 — 1, 3 — 2 ( $\Delta f=10$  — ширина энергетического спектра шума,  $\sigma$  — СКО шума). Из рисунка видно, что длительность выбросов случайного процесса с гауссовой статистикой имеет негауссово распределение.

Используя данное свойство случайного процесса, можно перейти от обнаружения на фоне гауссовых помех к обнаружению при воздействии помех с менее „опасным“ негауссовым распределением. При этом следует использовать для приема отраженного сигнала временной интервал между двумя выбросами помех на выходе приемного устройства. Это оказывается возможным, если время запаздывания сигнала сопоставимо с его длительностью, что характерно для схем ближней локации, в которых рабочая дистанция ограничена 10—15 метрами [6].

Используя данный метод, можно принимать слабые сигналы с малой вероятностью ложной тревоги, несмотря на сниженное значение отношения порог—шум решающего устройства. Возможность уменьшить порог позволяет снизить мощность лоцирующего импульса, а следовательно, сделать систему более энергетически эффективной.

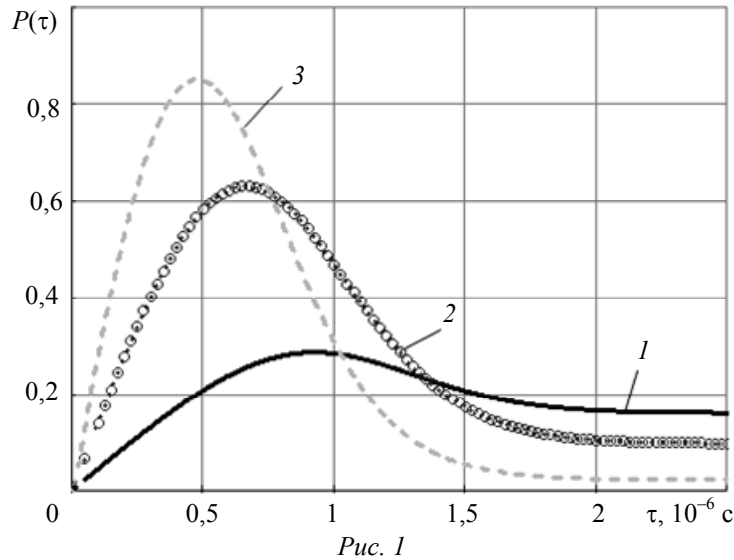


Рис. 1

Для реализации указанного способа приема необходимо синхронизировать момент запуска излучения со спадом шумового выброса. На рис. 2 проиллюстрирован выбор порога при шумовой синхронизации излучения: а) порог задает распределение вероятности интервалов между шумовыми выбросами, по которому рассчитывается обеспечиваемая вероятность ложной тревоги  $P_{ЛТ}$ , б) порог влияет на частоту посылки зондирующих импульсов  $N(H/\sigma)$  ( $1 — \Delta f=0,2$ ;  $2 — 1$ ;  $3 — 2$ ;  $4 — 10$  МГц). Вероятность ложной тревоги  $P_{ЛТ}$  в данном случае задается распределением шумовых интервалов и рабочей дистанцией  $l=Tc/2$ , где  $c$  — скорость света (рис. 2, а), а частота импульсов излучения определяется частотой пересечения уровня  $H$  с положительной производной (рис. 2, б) [7, 8]. Можно заметить, что требования к частоте посылок излучения и вероятности ложной тревоги противоречат друг другу. С одной стороны, требование низкой вероятности ложной тревоги обуславливает повышение порога детектирования (снижение длительности интервалов), а с другой — при высоком пороге резко снижается частота излучения лазера, это может привести к тому, что за время наблюдения не будет послан ни один зондирующий импульс.

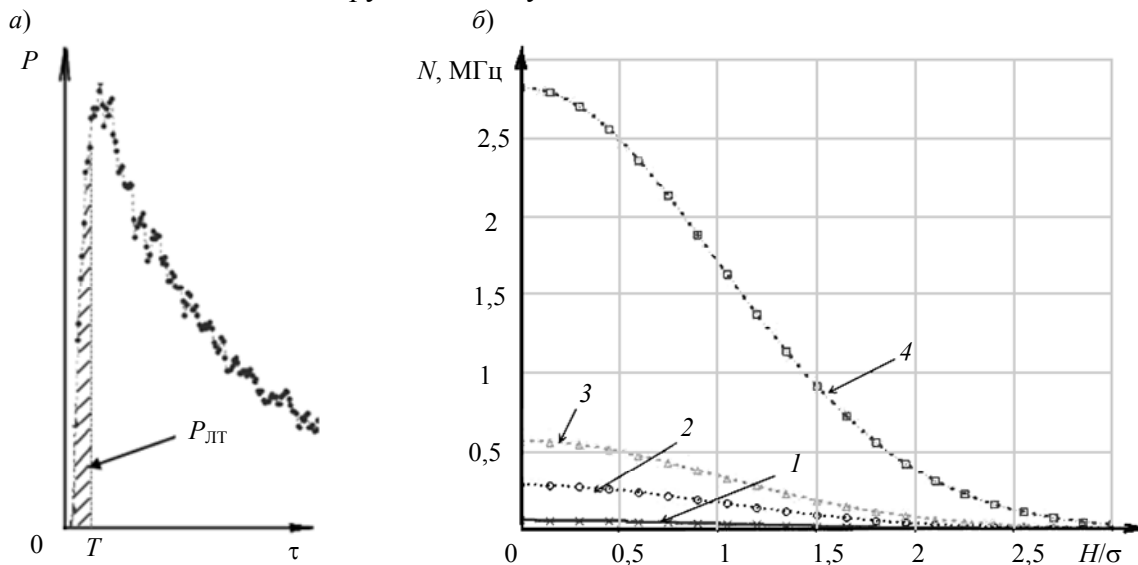


Рис. 2

Однако эти противоречия могут быть разрешены использованием двухуровневой схемы приема, в которой импульс излучения возникает в момент пересечения шумовым выбросом с отрицательной производной более низкого уровня, а принятие решения о наличии сигнала вырабатывается при пересечении процессом более высокого уровня [7, 8]. На рис. 3 продемонстрирована шумовая синхронизация излучения при двухуровневой схеме обработки (в кружке указан момент запуска излучателя).

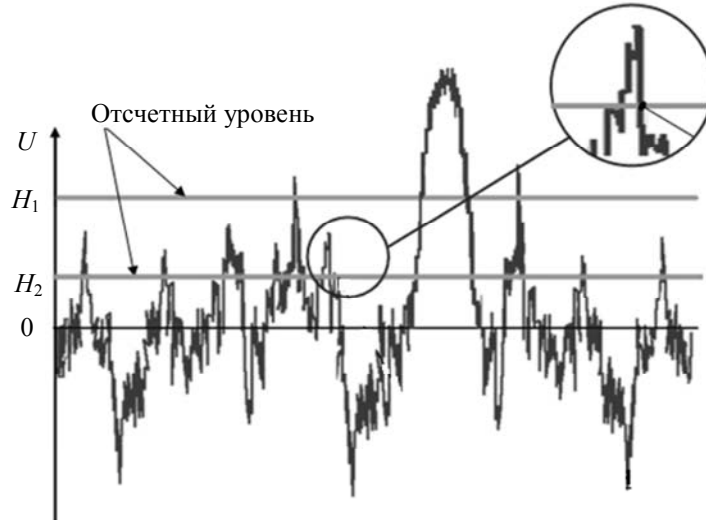


Рис. 3

При этом, если задача поиска оптимального уровня  $H_2$  в предложенном методе обнаружения сигналов на сегодня решена, то выбор верхнего уровня  $H_1$ , связанный с определением достижимой вероятности ложной тревоги, может быть выполнен только экспериментально, поскольку в аналитическом виде задача поиска плотности вероятности распределения шумовых интервалов при пересечении случайным процессом двух уровней (далее — двухуровневое пересечение) сегодня не решена даже приближенными методами [3—5].

Для поиска распределений шумовых интервалов при двухуровневом пересечении была разработана модель в среде LabView (рис. 4). Сформированный генератором случайного процесса шум поступает на вход низкочастотного фильтра с изменяемой полосой пропускания (фильтр Баттерворта первого порядка). Далее случайный сигнал (шум) поступает на два уровня  $H_1$  и  $H_2$ , сигналы с выхода которых запускают процедуры поиска моментов отрицательных и положительных пересечений соответственно.

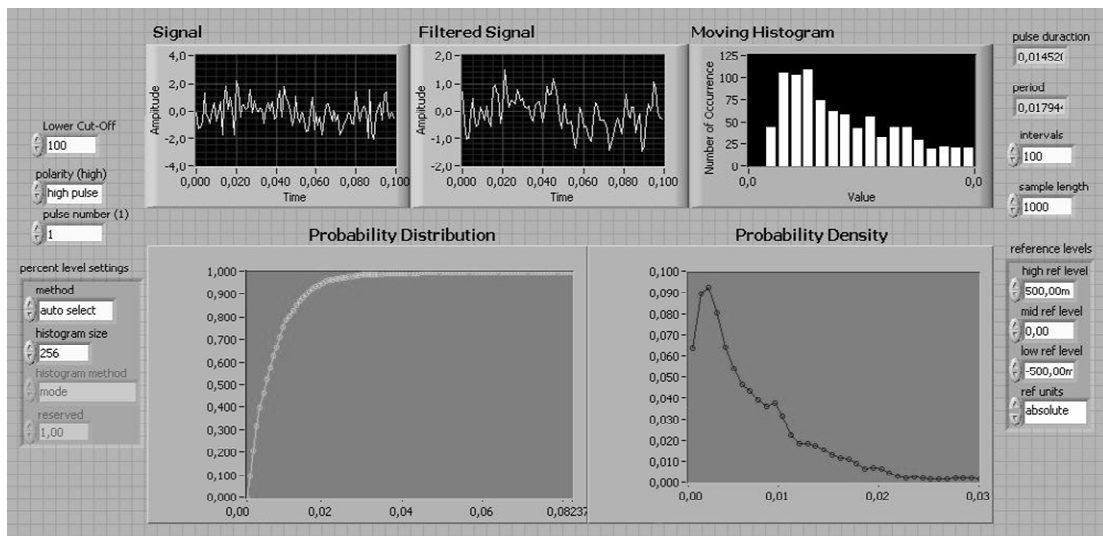


Рис. 4

Данные о найденных моментах пересечений являются входными для процедуры вычисления длительности интервалов. Полученная таким образом информация о числе и длительности интервалов передается на построитель гистограммы. Плотность распределения вероятности рассчитывается путем нормирования полученного результата по числу интервалов, после чего выводится на экран в виде графика; при равенстве значений  $H_1$  и  $H_2$  возможно получить распределение интервалов между выбросами, характерное для одноуровневого пересечения.

С помощью рассмотренной модели удалось получить экспериментальные данные, в которых присутствовали такие известные особенности искомым распределений, как многовершинность [4], экспоненциальное затухание „хвостов“ [2, 3] и др. Кроме того, результаты тестов для одноуровневого пересечения хорошо согласуются с полученными ранее экспериментальными данными [2—4]. На следующем этапе исследования планируется доработать существующую модель, с тем чтобы определять зависимость значения  $H_2$  от вероятности ложной тревоги.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rice S. O. The Mathematical Analysis of Random Noise // B.S.T.J., 1944. Vol. 23, N 3; 1945. Vol. 24, N 1.
2. Лебедько Е. Г. Теоретические основы передачи информации. СПб: Лань, 2011. 360 с.
3. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн. I. М.: Сов. радио, 1969. 752 с.
4. Тихонов В. И., Хименко В. И. Выбросы траекторий случайных процессов. М.: Наука, 1987.
5. Mupakata T. Some unsolved problems on the level crossing of random process // Unsolved Problems of Noise / Ed. by C.R. Doering, L.B. Kiss, and M.F. Shlesinger. Singapore: World Scientific, 1997. P. 213—222.
6. Мусьяков М. П., Миценко И. Д., Ванеев Г. Г. Проблемы ближней лазерной локации: Учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 295 с.
7. Лебедько Е. Г., Серикова М. Г. Анализ распределения интервалов между выбросами случайного процесса и возможность построения систем ближней локации с шумовой синхронизацией // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2010. Вып. 6(70). С. 1—5.
8. Serikova M. G. and Lebedko E. G. Noise-induced outpulsing technique for energy efficiency improvement of laser radar systems // Proc. SPIE. 2011. Vol. 8137. P. 813 718.

#### Сведения об авторах

- Мария Геннадьевна Серикова** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;  
E-mail: serikovamg@gmail.com
- Евгений Георгиевич Лебедько** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;  
E-mail: eleb@rambler.ru

Рекомендована факультетом ОИСТ

Поступила в редакцию  
25.11.11 г.