

ШУМОВАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В СИСТЕМАХ БЛИЖНЕЙ ОПТИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИИ

© 2013 Е. Г. Лебедевко, доктор техн. наук; М. Г. Серикова, аспирантка

НИУ ИТМО, Санкт-Петербург

E-mail: serikovamg@gmail.com

В системах ближней оптической локации, когда максимальные дистанции до объектов составляют 10–15 м, возникает возможность сокращения требуемой энергии излучения или габаритов приемной оптической системы при сохранении заданных вероятностных характеристик обнаружения посредством шумовой синхронизации момента излучения. В данном случае прием сигнала приходится на интервал между шумовыми выбросами, т.е. на такой отрезок времени, когда ложная тревога наименее вероятна. В статье проведен статистический анализ вероятностных распределений шумовых интервалов, на основе которого обозначен принцип расчета вероятностных характеристик обнаружения. Показано, что при отношении порог/шум, равном единице, энергия излучения, требуемая для обеспечения вероятности пропуска, равной 0,01, почти в три раза меньше, чем при классическом обнаружении, а при отношении порог/шум, равном 2, – в два раза меньше.

Ключевые слова: оптическая локация, оптимальный прием, распределение интервалов между выбросами случайного процесса, энергетический выигрыш.

Коды OCIS: 280.0280; 000.5490.

Поступила в редакцию 26.06.2013.

В системах оптической локации для обеспечения максимально возможного отношения сигнала к шуму в условиях гауссовой статистики последнего используется оптимальная фильтрация. При равномерном энергетическом спектре шума импульсная характеристика оптимального (согласованного) фильтра $g(t)$ является зеркальным отображением входного сигнала $s_1(t)$ –

$$g(t) = ns_1(t_0 - t).$$

При этом сигнал на выходе фильтра определяется интегралом Дюамеля –

$$s_2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\tau)s_1(t - \tau)d\tau.$$

Следовательно, если осуществлять запуск импульсного излучателя в момент пересечения шумового выброса с отрицательной произво-

дной на выходе приемно-усилительного тракта с достаточно низким уровнем, а прием отраженного сигнала проводить на интервале между выбросами выходного случайного процесса, то возникает возможность существенно уменьшить требуемую для надежного обнаружения энергию излучения.

При временной протяженности до объекта локации, сопоставимой с длительностью сигнала, рабочий интервал наблюдения равен двойной длительности сигнала. При этом вероятность появления шумового выброса с положительной производной, превышающего уровень срабатывания, на этом интервале будет соответствовать вероятности ложной тревоги α , которую можно определить соотношением

$$\alpha = \int_0^{2T_0} W(\tau, C_1)d\tau, \quad (1)$$

где $W(\tau, C_1)$ – плотность вероятностей интервалов между выбросами случайного процесса на выходе приемно-усилительного тракта при пересечении уровня C_1 , T_0 – максимальная временная протяженность до объекта локации.

Общее точное выражение плотности вероятностей интервалов между выбросами случайного процесса при пересечении постоянного уровня C_1 (рис. 1) определяется методом “счетчиков пересечений” [1, 2] и является чрезвычайно сложным, так как представляет собой медленно сходящиеся бесконечные ряды, членами которых являются интегралы неограниченно возрастающей кратности.

Для расчетов вероятности ложной тревоги интерес представляют малые временные интервалы. В этом случае при определении плотности вероятностей интервалов между выбросами случайных процессов [2, 3] можно воспользоваться приближенными методами –

$$W(\tau, C_1, t_0) = \frac{\int_{-\infty}^0 \int_0^{\infty} y y_1 W_4(C_1, y, C_1, t_0, t_0 + \tau) dy dy_1}{\int_0^{\infty} y W_2(C_1, y, t_0) dy}, \quad (2)$$

где $W_2(C_1, y, t_0)$ и $W_4(C_1, y, C_1, t_0, t_0 + \tau)$ – соответственно двумерная и четырехмерная плотности вероятностей случайного процесса и его первой производной в совпадающий момент времени t_0 и в два момента времени t_0 и $t_0 + \tau$.

Однако расчеты по приближенной формуле (2) дают кривые распределения, близкие к истинным, главным образом, на интервале, много меньшем времени корреляции выходного случайного процесса τ_k .

Имеются приближенные формулы для определения плотности вероятностей больших интервалов между выбросами случайного процес-

са [2], когда $\tau > \tau_k$. Эти зависимости для нашей задачи не представляют интереса. Для определения вероятностей ложной тревоги в нашем случае использование рассмотренного приближенного соотношения (1) может привести к существенным погрешностям. Кроме этого, при разработке систем ближней локации с использованием шумовой синхронизации приходится сталкиваться с противоречивыми условиями – обеспечение требуемой вероятности ложной тревоги и минимальной частоты излучения чистых импульсов. В ряде случаев для обеспечения заданной частоты излучения выбранный уровень C_1 пересечения выходного случайного процесса с отрицательной производной может привести к завышенной вероятности ложной тревоги. Следовательно, прием отраженного сигнала следует осуществлять с более высоким уровнем C_2 (рис. 1). В этом случае вероятность ложной тревоги будет определяться по формуле

$$\alpha = \int_0^{2T_0} W(\tau, C_1, C_2) d\tau. \quad (3)$$

Здесь $W(\tau, C_1, C_2)$ – плотность вероятностей интервалов ($\tau = \tau_2$) между выбросами случайного процесса, пересекающими два различных уровня (нижний уровень C_1 с отрицательной производной, а верхний C_2 – с положительной производной).

Следует отметить, что на увеличение уровня приема может влиять окрашенный характер энергетического спектра шумов, приведенных ко входу фотоприемного тракта широкополных систем ближней оптической локации, в которых используются фотоприемники с относительно большим диаметром чувствительной площадки, а следовательно, и большой барьерной емкостью p - n -перехода. Энергетический спектр шума в этом случае описывается зависимостью [4]

$$G(\omega) = G_1(1 + m + m\omega^2 T^2), \quad (4)$$

где $m = G_2/(G_1 R_2 S_0^2)$ – отношение энергетического спектра шумов усилителя G_2 , приведенных ко входу, к энергетическому спектру шумов входной цепи G_1 ; $T = RC_\phi$ – постоянная времени входной цепи, R – сопротивление нагрузки фотоприемника, C_ϕ – емкость фотоприемного контура, S_0 – крутизна вольт-амперных характеристик транзистора первого каскада усиления.

Естественно, в этом случае имеет место резкое возрастание величины энергетического

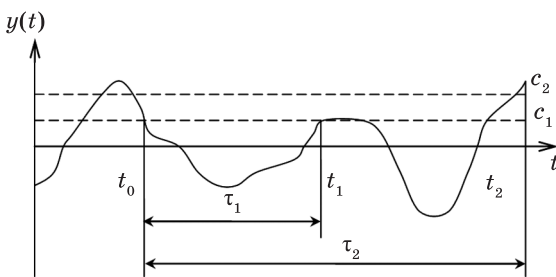


Рис. 1. Реализация случайного процесса $y(t)$ на выходе приемно-усилительного тракта.

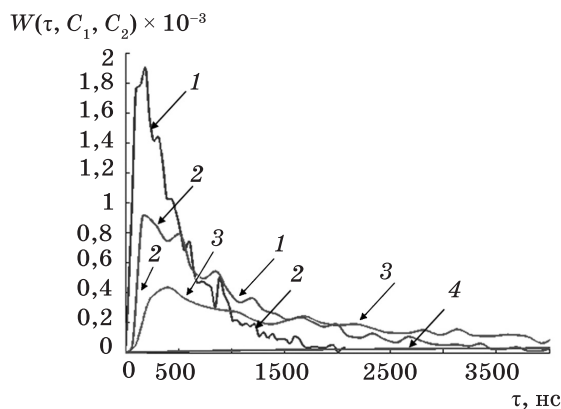


Рис. 2. Плотности вероятности $W(\tau, C_1, C_2)$ длительностей интервалов между выбросами случайного процесса при длительности зондирующего импульса $T_0 = 10^{-7}$ с. 1 – $C_1 = C_2 = 1\sigma$, 2 – $C_1 = 1\sigma, C_2 = 1,5\sigma$, 3 – $C_1 = 1\sigma, C_2 = 2\sigma$, 4 – $C_1 = 1\sigma, C_2 = 3\sigma$.

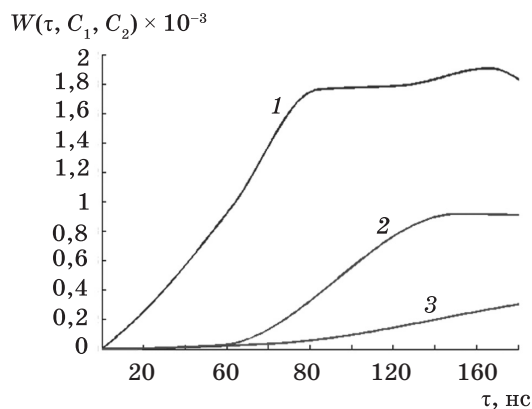


Рис. 3. Начальные участки плотностей вероятности $W(\tau, C_1, C_2)$ длительностей интервалов между выбросами случайного процесса при длительности зондирующего импульса $T_0 = 10^{-7}$ с.

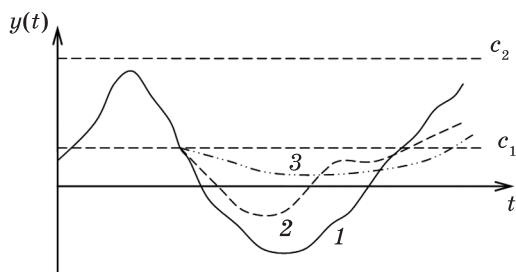


Рис. 4. Возможные реализации выходного случайного процесса на интервале наблюдения.

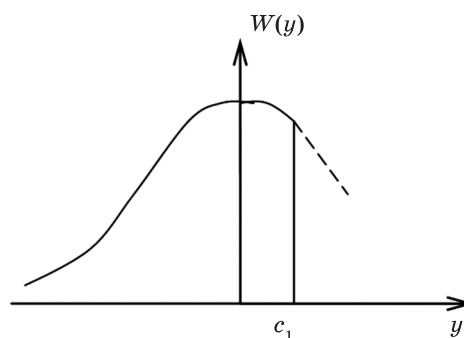


Рис. 5. Усеченный нормальный закон распределения.

спектра с ростом частоты. Это может привести к увеличению вероятности появления высокочастотного выброса шума на интервале наблюдения.

Для определения плотностей вероятностей $W(\tau, C_1)$ и $W(\tau, C_1, C_2)$ использовался метод компьютерного моделирования. На рис. 2 приведены плотности вероятности $W(\tau, C_1, C_2)$, а на рис. 3 – начальные участки этих функций.

Приведенные кривые распределения $W(\tau, C_1, C_2)$ при $C_1 = C_2$ совпадают с кривыми распределения $W(\tau, C_1)$, полученными экспериментально [5], что позволяет с достаточно высокой достоверностью использовать их для расчета вероятности ложной тревоги α .

Вероятность пропуска сигнала будет определяться на участке $2T_0$, на котором случайный

процесс ниже уровня C_1 либо C_2 , а его возможные реализации приведены на рис. 4.

Плотность вероятностей на этих интервалах можно рассматривать как усеченный нормальный закон распределения, график которого приведен на рис. 5.

В этом случае вероятность ложного отбоя β (пропуска сигнала) будет определяться по формуле

$$\beta = 0,5[1 + \Phi(C - s - m_1/\sigma)]. \quad (5)$$

Здесь

s и σ – максимальное значение принимаемого сигнала и среднеквадратическое значение шумов на выходе приемно-усилительного тракта локатора соответственно, $C = C_1$,

$$m_1 = -k 0,8\sigma \left[0,5 - \int_0^{C_1/(\sqrt{2}\sigma)} x \exp(-x^2) dx \right] =$$

$$= k 0,4\sigma \exp(-C_1^2/(2\sigma^2)) - \text{математическое ожидание процесса на интервале } 2T_0, \text{ где величина } k \text{ определяется из условия}$$

$$\left[\frac{k}{(\sqrt{2}\pi\sigma)} \int_{-\infty}^{C_1} \exp(-x^2/(2\sigma^2)) dx = \right.$$

$$\left. = k/2[1 + \Phi(C_1/\sigma)] = 1 \right.$$

и равна

$$k = 2/(1 + \Phi(C_1/\sigma)),$$

$\Phi(z) = \left[\frac{2}{(\sqrt{2\pi})} \int_0^z \exp(-t^2/2) dt \right]^2$ – интегральная функция Лапласа.

Следовательно, математическое ожидание равно

$$m_1 = -0,8\sigma \exp[-C_1^2/(2\sigma^2)]/[1 + \Phi(C_1/\sigma)]. \quad (6)$$

Тогда, например, для вероятности $\beta = 10^{-2}$ при $C_1 = \sigma$ получим $m_1 = -0,28\sigma$. В этом случае расчеты по формуле (5) показывают, что требуемая энергия излучения почти в три раза меньше, чем при классическом обнаружении. При $C_1 = 2\sigma$ имеем $m_1 = -0,05\sigma$, что обеспечивает уменьшение энергии в два раза.

Как видим, в данном случае имеет место парадоксальная ситуация, при которой мешающее воздействие (шумы приемной системы)

создает более благоприятные условия для обнаружения по сравнению с классической задачей обнаружения. Можно предположить, что в этом случае ложные срабатывания определяются менее опасным процессом (рис. 2), чем гауссовый (который в соответствии с решением вариационной задачи теории информации при известной средней мощности является наиболее опасным для обнаружения и оценки параметров сигналов [6]).

Принцип шумовой синхронизации импульсного излучения может быть реализован в системе ближней оптической локации, функциональная схема которого приведена на рис. 6.

Схема совпадений CC_2 обеспечивает поступление сигнала с ПУ₂ к устройству принятия решения (УПР) только на интервале наблюдения.

При низком уровне срабатывания ПУ₁ частота его срабатывания много больше, чем частота синхроимпульсов. Поэтому запуск излучателя будет осуществляться спадом шумового выброса, снимаемого с видеосуилителя, с частотой синхроимпульсов.

На рис. 7 приведены временные диаграммы, поясняющие работу локатора. Цифры позиций временных диаграмм (1)–(6) соответствуют цифрам на выходе элементов структурной схемы; кривые 1 и 2 на позиции (1) соответствуют отсутствию и наличию отраженного сигнала соответственно.

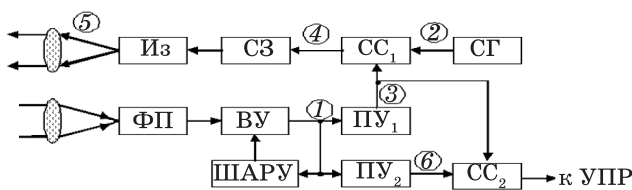


Рис. 6. Функциональная схема системы ближней оптической локации с шумовой синхронизацией излучения.

Из – излучатель, СЗ – схема запуска излучателя, СС – схема совпадений, СГ – синхрогенератор, ФП – фотоприемник, ВУ – видеоусилитель, ПУ₁ – 1-е пороговое устройство, срабатывающее по спаду шумового выброса, ПУ₂ – 2-е пороговое устройство, срабатывающее по фронту шумового выброса, ШАРУ – схема автоматической регулировки усиления по шумам, УПР – устройство принятия решения.

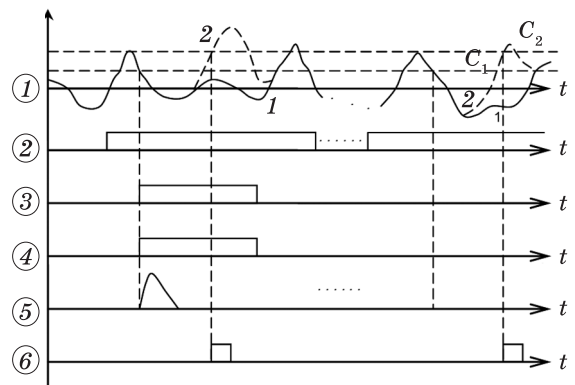


Рис. 7. Временные диаграммы, поясняющие работу схемы.

Следует заметить, что уровень срабатывания порогового устройства ПУ₂ можно сделать изменяющимся по величине за время наблюдения. Например, повышающимся от уровня ПУ₁ до расчетного уровня ПУ₂, что в определенной степени снизит вероятность ложного отбоя (вероятность пропуска) или будет с более высокого уровня понижаться до расчетного уровня, дополнительно снижая вероятность ложного срабатывания от помехи обратного рассеяния.

С целью обеспечения низкого значения вероятности ложной тревоги решение о наличии объекта можно принимать только при фиксации нескольких подряд (например трех) отраженных сигналов. В этом случае вероятность ложной тревоги будет определяться соотношением

$$\alpha_3 = \alpha^3,$$

где α – вероятность ложной тревоги, определяемая соотношением (1).

Естественно, что для обеспечения заданной вероятности правильного обнаружения из трех следующих подряд импульсов вероятность обнаружения одного импульса должна быть равной

$$P_{\text{пр}} = \sqrt[3]{1 - \beta}.$$

Например, это приведет к увеличению требуемой мощности оптического сигнала при $C_1 = \sigma$ и $C_1 = 2\sigma$ лишь на 8,3% и 6,5% соответственно.

При этом следует заметить, что принятие решения по тем же трем импульсам в классической задаче обнаружения даст незначительный энергетический выигрыш (порядка 10–17%).

Таким образом, в широкополосных системах ближней оптической локации в условиях оптимальной обработки принимаемого процесса из-за инерционного приема не удастся каким-либо способом получить энергетический выигрыш [7]. И только использование принципа шумовой синхронизации излучения дает возможность получить существенный энергетический выигрыш, позволяющий минимизировать энергетические или габаритно-весовые характеристики (уменьшение площади входного зрачка приемного объектива).

Естественно, что принцип шумовой синхронизации излучения применим и для радиотехнических систем ближней локации.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Т. 1. М.: Сов.радио, 1966. 728 с.
2. Фомин Я.А. Теория выбросов случайных процессов. М.: Связь, 1980. 216 с.
3. Тихонов В.И. Выбросы случайных процессов. М.: Наука, 1970. 392 с.
4. Лебедько Е.Г., Порфирьев Л.Ф., Хайтун Ф.И. Теория и расчет импульсных и цифровых оптико-электронных систем. Л.: Машиностроение, 1984. 192 с.
5. Лебедько Е.Г., Аверьянов Г.А., Егоров А.С., Романов А.М., Хайтун Ф.И. Определение дифференциальных законов распределения интервалов между выбросами случайного процесса // Приборы и техника эксперимента. 1971. № 6. С. 28–32.
6. Лебедько Е.Г. Теоретические основы передачи информации. М. – СПб.: Лань, 2011. 350 с.
7. Лебедько Е.Г. Системы оптической локации. Ч 2. СПб, СПбНИУ ИТМО, 2012. 128 с.