

АНАЛИЗ СКРЫТНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СИГНАЛОВ С НЕИЗВЕСТНЫМИ МОМЕНТАМИ ПОЯВЛЕНИЯ И ИСЧЕЗНОВЕНИЯ*

А. П. Трифонов, Ю. Э. Корчагин

*Воронежский государственный университет,
Национальный исследовательский университет «МЭИ»*

Поступила в редакцию 21.12.2014 г.

Аннотация: проведен сравнительный анализ алгоритмов обнаружения прямоугольного импульса на фоне аддитивного гауссовского белого шума при реализации санкционированного и несанкционированного доступа к передаваемой информации. Предполагалось, что передаваемая информация заключается в факте наличия или отсутствия сигнала. Несанкционированный доступ стороннего наблюдателя осуществляется при полном или частичном незнании параметров сигнала. Степень скрытности передаваемой информации характеризуется параметром скрытности, определяющим увеличение порогового отношения сигнал/шум при несанкционированном доступе по сравнению с санкционированным.

Ключевые слова: обнаружение сигнала, санкционированный и несанкционированный доступ, пороговое отношение сигнал/шум, вероятности ошибок.

ANALYSIS OF TRANSMISSION STEALTH OF THE USE SIGNALS WITH UNKNOWN APPEARANCE AND DISAPPEARANCE

A. P. Trifonov, Y. E. Korchagin

Abstract: a comparative analysis of the rectangular pulse detection algorithms in additive Gaussian white noise in the implementation of authorized and unauthorized access to the transmitted information. It was assumed that the transmitted information is the presence or absence of the signal. Unauthorized access to the casual observer is carried out by full or partial ignorance of signal parameters. The degree of secrecy of information transmitted by the parameter stealth determining, the increase in the threshold signal / noise ratio at unauthorized access compared to authorized access.

Keywords: signal detection, authorized and unauthorized access, the threshold signal / noise ratio, probability of error.

В различных приложениях теории связи для передачи сообщений используются прямоугольные импульсы вида [1]–[4]

$$s(t, \kappa_0, \chi_0) = \begin{cases} a, & \kappa_0 \leq t \leq \chi_0, \\ 0, & t < \kappa_0, t > \chi_0, \end{cases} \quad (1)$$

где a — амплитуда сигнала, κ_0 и χ_0 — моменты его появления и исчезновения, которые могут принимать значения из априорных интервалов

$$\kappa_0 \in [\kappa_{\min}, \kappa_{\max}], \chi_0 \in [\chi_{\min}, \chi_{\max}], \kappa_{\max} < \chi_{\min}. \quad (2)$$

* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №14-49-00079).

© Трифонов А. П., Корчагин Ю. Э., 2015

Пусть сигнал (1) передается по каналу, в котором действует аддитивный гауссовский белый шум с односторонней спектральной плотностью N_0 . Наблюдателю, которому адресовано сообщение, априори известны все параметры сигнала, а также статистические характеристики шума. Предполагается, что передаваемая информация заключается в факте наличия или отсутствия сигнала (1). Сторонний наблюдатель для реализации несанкционированного доступа к передаваемой информации с целью её использования или разрушения должен установить факт наличия сигнала, то есть обнаружить его. При этом несанкционированный доступ стороннего наблюдателя возможен при полном или частичном знании параметров сигнала или определении этих параметров в ходе наблюдения за сигналом.

Ниже приведен сравнительный анализ алгоритмов обнаружения сигнала (1) на фоне аддитивного гауссовского белого шума при реализации санкционированного и несанкционированного доступа к передаваемой информации. В результате сопоставления пороговых значений отношения сигнал/шум (ОСШ) при санкционированном и несанкционированном доступе вводится параметр скрытности, который дает количественную оценку степени скрытности передаваемой информации.

Задачу обнаружения сигнала сформулируем в терминах теории проверки статистических гипотез [1]. Подлежит проверке гипотеза $H_0 : x(t) = n(t)$ — сигнал отсутствует в наблюдаемой реализации $x(t)$, против простой альтернативы $H_1 : x(t) = s(t, \kappa_0, \chi_0) + n(t)$ — сигнал присутствует. Здесь $n(t)$ — реализация гауссовского белого шума с односторонней спектральной плотностью N_0 .

Для синтеза приемного устройства воспользуемся методом максимального правдоподобия. Согласно этому методу, приемник должен формировать логарифм функционала отношения правдоподобия (ФОП) [2]

$$L_0 = \frac{2a}{N_0} \int_{\kappa_0}^{x_0} [x(t) - a/2] dt$$

и сравнивать его с порогом c , который определяется выбранным критерием оптимальности. Решение о наличии сигнала принимается когда порог превышен, то есть $L_0 > c$.

Вероятности ошибок 1-го рода (ложной тревоги) α_0 и 2-го рода (пропуска сигнала) β_0 найдены в [1]

$$\alpha_0 = 1 - \Phi\left(\frac{c}{z_{\max}\nu_0} + \frac{z_{\max}\nu_0}{2}\right), \quad \beta_0 = \Phi\left(\frac{c}{z_{\max}\nu_0} - \frac{z_{\max}\nu_0}{2}\right). \quad (3)$$

Здесь $z_{\max}^2 = 2a^2 T_{\max}/N_0$ — максимально возможное ОСШ, $T_{\max} = \chi_{\max} - \kappa_{\min}$ — максимально возможная длительность сигнала, $\nu_0 = \sqrt{\mu_{\kappa} + \mu_{\chi} + 1/k}$, $k = T_{\max}/T_{\min}$, $T_{\min} = \chi_{\min} - \kappa_{\max}$, $\mu_{\kappa} = (\kappa_{\max} - \kappa_0)/T_{\max}$, $\mu_{\chi} = (\chi_0 - \chi_{\min})/T_{\max}$, $\Phi(x) = \int_{-\infty}^x \exp(-t^2/2) dt / \sqrt{2\pi}$ — интеграл вероятности.

Качество обнаружения будем характеризовать пороговым ОСШ $z_{0t}(p)$, которое обеспечивает заданный уровень вероятностей ложной тревоги и пропуска сигнала $\alpha_0(c, z_{0t}) = \beta_0(c, z_{0t}) = p$, то есть $z_{0t}(p)$ является решением системы уравнений

$$\begin{cases} \alpha_0(c, z_{0t}) = p, \\ \beta_0(c, z_{0t}) = p. \end{cases} \quad (4)$$

Используя формулы (3) найдем из первого уравнения системы (4) порог c

$$c = z_{0t}\nu_0 \operatorname{arc}\Phi(1-p) - z_{0t}^2\nu_0/2, \quad (5)$$

где $\text{arc}\Phi(\cdot)$ — функция, обратная интегралу вероятности. Подставляя выражение (5) во второе уравнение системы (4) и решая его, получаем при $p < 1/2$ пороговое ОСШ в виде

$$z_{0t} = 2\text{arc}\Phi(1 - p)/\nu_0. \quad (6)$$

Рассмотрим теперь эффективность обнаружения сигнала (1) сторонним наблюдателем, которому неизвестны моменты появления и исчезновения κ_0 и χ_0 . Подлежит проверке гипотеза $H_0 : x(t) = n(t)$ против сложной альтернативы $H_1 : x(t) = s(t, \kappa_0, \chi_0) + n(t)$. Простейшим способом несанкционированного доступа к передаваемой информации при неизвестных моментах появления и исчезновения является применение квазиравдоподобного алгоритма обнаружения. Приемник формирует логарифм ФОП [1]

$$L(\kappa, \chi) = \frac{2a}{N_0} \int_{\kappa}^{\chi} [x(t) - a/2] dt \quad (7)$$

для некоторых ожидаемых (прогнозируемых) моментов появления κ^* и исчезновения χ^* .

$$L^* = L(\kappa^*, \chi^*) \quad (8)$$

и сравнивает его с порогом c . Решение о наличии сигнала принимается при $L^* > c$. На рис. 1 представлена блок-схема такого обнаружителя.

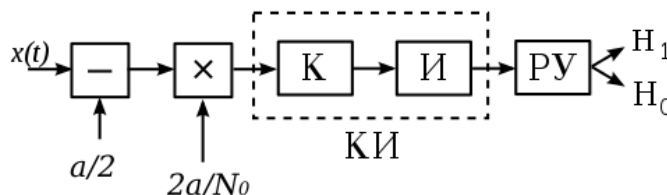


Рис. 1.

Здесь ключ K замыкается на время $[\kappa^*, \chi^*]$, а все остальное время остается разомкнутым. Выделенные штриховой линией ключ K и интегратор I будем называть коммутируемым интегратором (КИ). Решающее устройство $РУ$ сравнивает сформированный на выходе КИ логарифм ФОП L^* с порогом c и выносит решение в пользу одной из гипотез.

Вероятности ошибок 1-го рода (ложной тревоги) α_q и 2-го рода (пропуска сигнала) β_q определяются выражениями

$$\alpha_q = P[L^* > c | H_0] = 1 - F(c | H_0), \quad (9)$$

$$\beta_q = P[L^* < c | H_1] = F(c | H_1), \quad (10)$$

где

$$F(x | H_j) = P[L^* < x | H_j], \quad j = 0; 1$$

— функция распределения случайной величины L^* при гипотезе H_j . Согласно (7), (8), величина L^* формируется как линейное преобразование гауссовского случайного процесса $x(t)$, и, следовательно, является гауссовской. Для полного статистического описания L^* (8) достаточно найти её математическое ожидание и дисперсию при обеих гипотезах. Выполняя усреднение, находим

$$m_0 = \langle L^* | H_0 \rangle = -z_{\max}^2 (\mu_{\kappa} + \mu_{\chi} + 1/k) (1 - \delta\kappa + \delta\chi) / 2, \quad (11)$$

$$m_1 = \langle L^* | H_1 \rangle = z_{\max}^2 (\mu_\kappa + \mu_\chi + 1/k) (1 - |\delta\kappa| - |\delta\chi|)/2 \quad , \quad (12)$$

$$D = \langle [L^* - \langle L^* \rangle]^2 | H_{1,2} \rangle = z_{\max}^2 (\mu_\kappa + \mu_\chi + 1/k) (1 - \delta\kappa + \delta\chi) \quad , \quad (13)$$

где $\delta\kappa = (\kappa^* - \kappa_0)/(\chi_0 - \kappa_0)$, $\delta\chi = (\chi^* - \chi_0)/(\chi_0 - \kappa_0)$.

Используя (11) – (13), можем записать функцию распределения гауссовской случайной величины L^* в виде

$$F(x | H_j) = \Phi\left(\frac{x - m_j}{\sqrt{D}}\right). \quad (14)$$

Подставляя функцию (14) в выражения (9) и (10), получаем, с учетом (11) – (13), вероятности ошибок обнаружения

$$\alpha_q = 1 - \Phi\left(\frac{c}{z_{\max}\nu_q} + \frac{z_{\max}\nu_q}{2}\right), \quad \beta_q = \Phi\left(\frac{c}{z_{\max}\nu_q} - \frac{z_{\max}\nu_q}{2}\Delta\right),$$

где $\nu_q = \sqrt{(\mu_\kappa + \mu_\chi + 1/k)(1 + \delta\chi - \delta\kappa)}$, $\Delta = (1 - |\delta\chi| - |\delta\kappa|)/(1 + \delta\chi - \delta\kappa)$.

Качество обнаружения будем характеризовать пороговым ОСШ $z_{qt}(p)$, которое обеспечивает заданный уровень вероятностей ошибок $\alpha_q(c, z_{qt}) = \beta_q(c, z_{qt}) = p$, то есть является решением системы уравнений

$$\begin{cases} \alpha_q(c, z_{qt}) = p, \\ \beta_q(c, z_{qt}) = p. \end{cases} \quad (15)$$

Определяя из первого уравнения (15) порог $c = z_{qt}\nu_q \text{arc}\Phi(1 - p) - z_{qt}^2\nu_q/2$ и подставляя его во второе уравнение, находим пороговое ОСШ z_{qt} в виде

$$z_{qt} = \frac{4\text{arc}\Phi(1 - p)(1 + \delta\chi - \delta\kappa)}{\nu_q(2 + \delta\chi - \delta\kappa - |\delta\kappa| - |\delta\chi|)}.$$

Количественно степень скрытности сигнала (1) будем характеризовать отношением

$$\varphi = z_t/z_{0t},$$

где z_t — пороговое ОСШ при несанкционированном доступе к передаваемой информации. Если сторонний наблюдатель использует квазиравдоподобный обнаружитель, то параметр скрытности имеет вид

$$\varphi_q = \frac{z_{qt}}{z_{0t}} = \frac{2\sqrt{1 + \delta\chi - \delta\kappa}}{2 + \delta\chi - \delta\kappa - |\delta\kappa| - |\delta\chi|}. \quad (16)$$

Положим, что истинные моменты появления и исчезновения располагаются посередине своих априорных интервалов возможных значений (2), то есть $\kappa_0 = (\kappa_{\min} + \kappa_{\max})/2$, $\chi_0 = (\chi_{\min} + \chi_{\max})/2$. Поскольку ожидаемые моменты появления и исчезновения также принадлежат этим интервалам, то можем записать

$$|\delta\kappa| \leq k\eta_\kappa/(1 + k), \quad |\delta\chi| \leq k\eta_\chi/(1 + k),$$

где $\eta_\kappa = (\kappa_{\max} - \kappa_{\min})/T_{\max}$, $\eta_\chi = (\chi_{\max} - \chi_{\min})/T_{\max}$ — нормированные длины априорных интервалов (2) возможных значений моментов появления и исчезновения сигнала (1). Предполагая, что интервалы возможных значений моментов появления и исчезновения имеют одинаковую длину $\eta_\kappa = \eta_\chi = (k - 1)/2k$, получаем

$$|\delta\kappa| \leq (k - 1)/2(k + 1), \quad |\delta\chi| \leq (k - 1)/2(k + 1).$$

На рис. 2, 3 представлены графики зависимости параметра скрытности φ_q (16) от $\delta\kappa$ при фиксированных $\delta\chi$ и от $\delta\chi$ при фиксированных $\delta\kappa$ соответственно. Все кривые на рисунках

рассчитаны для $k = 50$, то есть $|\delta\kappa| \leq 0,5, |\delta\chi| \leq 0,5$. Как видно из рис. 2, 3 максимальная эффективность обнаружения достигается лишь при совпадении ожидаемых и истинных моментов появления и исчезновения, а по мере роста их различия скрытность передачи информации возрастает.

Пусть теперь ожидаемые моменты появления и исчезновения располагаются посередине априорных интервалов (2), то есть $\kappa^* = (\kappa_{\min} + \kappa_{\max})/2, \chi^* = (\chi_{\min} + \chi_{\max})/2$. Тогда расстройки $\delta\kappa$ и $\delta\chi$ можно переписать в виде

$$\delta\kappa = \frac{2\mu_\kappa - \eta_\kappa}{2(\mu_\kappa + \mu_\chi + 1/k)}, \quad \delta\chi = -\frac{2\mu_\chi - \eta_\chi}{2(\mu_\kappa + \mu_\chi + 1/k)}.$$

Полагая, что длины априорных интервалов одинаковы, то есть $\eta_\kappa = \eta_\chi = (k-1)/2k$, получаем выражения для параметра скрытности (16):

- при минимальной длительности принимаемого сигнала

$$\varphi_q = \sqrt{(1+k)/2},$$

- при максимальной длительности

$$\varphi_q = \sqrt{2k/(k+1)},$$

- при $\kappa_0 = \kappa_{\min}, \chi_0 = \chi_{\min}$ или $\kappa_0 = \kappa_{\max}, \chi_0 = \chi_{\max}$

$$\varphi_q = 2(k+1)/(k+3).$$

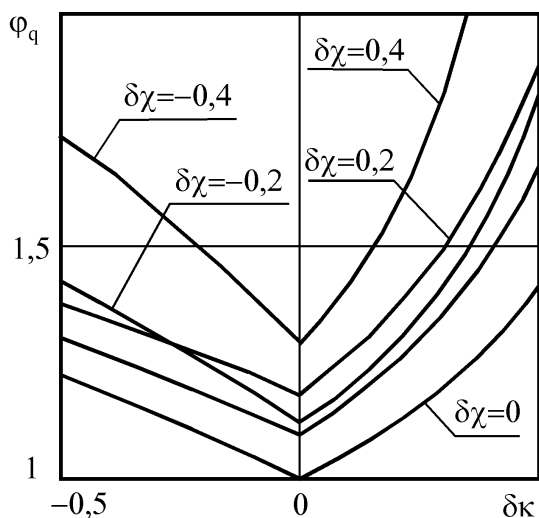


Рис. 2.

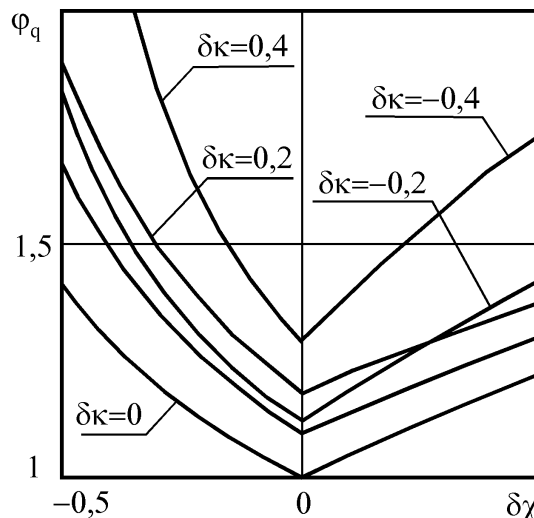


Рис. 3.

На рис. 4 сплошными линиями представлены графики зависимости параметра скрытности φ_q (16) от k . Кривая 1 соответствует минимальной длительности принимаемого сигнала, 2 — максимальной длительности, 3 — сигналу с моментами появления и исчезновения $\kappa_0 = \kappa_{\min}, \chi_0 = \chi_{\min}$ или $\kappa_0 = \kappa_{\max}, \chi_0 = \chi_{\max}$.

Как видно из рис. 2–4 при достаточно больших расстройках ожидаемых моментов появления и исчезновения относительно их истинных значений эффективность обнаружения может оказаться недостаточной, а скрытность передачи весьма высокой.

В этой связи рассмотрим возможность реализации несанкционированного доступа к передаваемой информации с помощью максимально правдоподобного обнаружителя. По-прежнему, подлежит проверке гипотеза $H_0 : x(t) = n(t)$ против сложной альтернативы

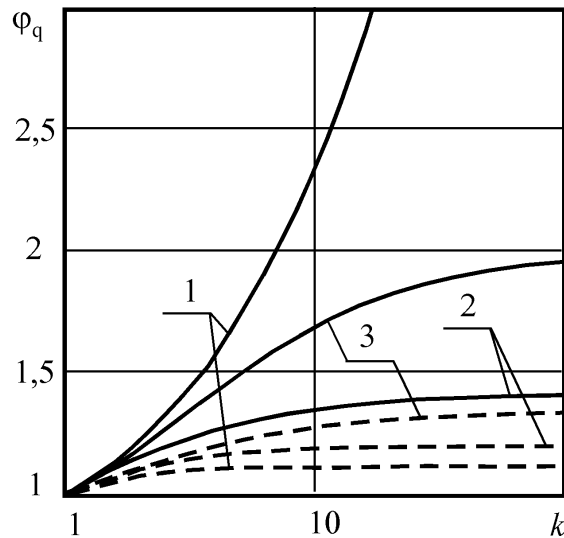


Рис. 4.

H_1 : $x(t) = s(t, \kappa_0, \chi_0) + n(t)$. Согласно методу максимального правдоподобия [1], приемник формирует логарифм ФОП (7) для всех возможных значений моментов появления и исчезновения (2), находит его абсолютный (наибольший) максимум $L = \sup L(\kappa, \chi)$ и сравнивает его с порогом c . В случае превышения порога принимается решение о наличии сигнала. Для определения структуры максимально правдоподобного обнаружителя перепишем логарифм ФОП (7) в виде [3]

$$L(\kappa, \chi) = \frac{2a}{N_0} \int_{\kappa}^{t_0} [x(t) - a/2] dt + \frac{2a}{N_0} \int_{t_0}^{\chi} [x(t) - a/2] dt \quad ,$$

где t_0 — точка, принадлежащая интервалу $(\kappa_{\max}, \chi_{\min})$. Тогда приемник может быть реализован в виде блок-схемы рис. 5.

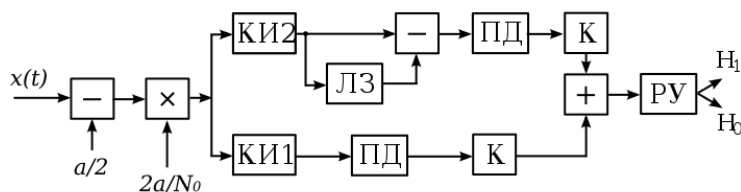


Рис. 5.

Здесь коммутируемые интеграторы КИ1 и КИ2 работают в интервалах времени $[t_0, \chi_{\max}]$ и $[\kappa_{\min}, t_0]$ соответственно. Линия задержки ЛЗ осуществляет задержку сигнала на время $t_0 - \kappa_{\min}$. Ключи К замыкаются в момент времени $t = \chi_{\max}$. Решающее устройство РУ сравнивает с порогом c сумму выходных сигналов пиковых детекторов ПД и выносит решение о наличии сигнала при превышении порога c .

Характеристики работы максимально правдоподобного обнаружителя — вероятности ложной тревоги α_m и пропуска сигнала β_m рассматривались в работе [3]. Вероятности ошибок обнаружения можно рассчитать по формулам (9) и (10), где под $F(x|H_j)$ понимается найденная в [3] функция распределения величины абсолютного максимума случайного поля (7).

Тогда вероятности ложной тревоги и пропуска сигнала максимально правдоподобного обнаружителя определяются выражениями [3], [5]

$$\alpha_m = 1 - \frac{1}{\eta\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty \int_0^\infty \left(\frac{\xi_1 + \xi_2 - c/z_{\max}}{\sqrt{\eta}} - \frac{z_{\max}\sqrt{\eta}}{2} \right) \exp \left[-\frac{(\xi_1 + \xi_2 - c/z_{\max} - z_{\max}\eta/2)^2}{2\eta} \right] \times \\ \times \left[\Phi \left(\frac{z_{\max}}{2} \sqrt{\eta_\kappa} + \frac{\xi_1}{\sqrt{\eta_\kappa}} \right) - \exp(-\xi_1 z_{\max}) \Phi \left(\frac{z_{\max}}{2} \sqrt{\eta_\kappa} - \frac{\xi_1}{\sqrt{\eta_\kappa}} \right) \right] \times \\ \times \left[\Phi \left(\frac{z_{\max}}{2} \sqrt{\eta_\chi} + \frac{\xi_2}{\sqrt{\eta_\chi}} \right) - \exp(-\xi_2 z_{\max}) \Phi \left(\frac{z_{\max}}{2} \sqrt{\eta_\chi} - \frac{\xi_2}{\sqrt{\eta_\chi}} \right) \right] d\xi_1 d\xi_2, \quad (17)$$

$$\beta_m = \frac{\exp[-z_{\max}^2 \mu_\chi / 8 - z_{\max}^2 \mu_\kappa / 8]}{2\pi \sqrt{\mu_\kappa \mu_\chi}} \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \exp \left[-\frac{(\xi_1 + \xi_3 - c/z_{\max} + \eta_0 z_{\max}/2)^2}{2\eta_0} \right] \times \\ \times \left[\Phi \left(\frac{z_{\max}}{2} \sqrt{\eta_\chi - \mu_\chi} + \frac{\xi_4}{\sqrt{\eta_\chi - \mu_\chi}} \right) - \exp(-z_{\max} \xi_4) \Phi \left(\frac{z_{\max}}{2} \sqrt{\eta_\chi - \mu_\chi} - \frac{\xi_4}{\sqrt{\eta_\chi - \mu_\chi}} \right) \right] \times \\ \times \left[\Phi \left(\frac{z_{\max}}{2} \sqrt{\eta_\kappa - \mu_\kappa} + \frac{\xi_2}{\sqrt{\eta_\kappa - \mu_\kappa}} \right) - \exp(-z_{\max} \xi_2) \Phi \left(\frac{z_{\max}}{2} \sqrt{\eta_\kappa - \mu_\kappa} - \frac{\xi_2}{\sqrt{\eta_\kappa - \mu_\kappa}} \right) \right] \times \\ \times \left\{ \exp \left[-\frac{(\xi_4 - \xi_3)^2}{2\mu_\chi} \right] - \exp \left[-\frac{(\xi_4 + \xi_3)^2}{2\mu_\chi} \right] \right\} \left\{ \exp \left[-\frac{(\xi_2 - \xi_1)^2}{2\mu_\kappa} \right] - \exp \left[-\frac{(\xi_2 + \xi_1)^2}{2\mu_\kappa} \right] \right\} \times \\ \times \left[\frac{\xi_1 + \xi_3 - c/z_{\max} + \eta_0 z_{\max}/2}{\sqrt{2\pi\eta_0}} \right]^{3/2} \exp \left[\frac{z_{\max}}{2} (\xi_1 - \xi_2 + \xi_3 - \xi_4) \right] d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3 d\xi_4. \quad (18)$$

где $\eta_0 = 1/k - \mu_\kappa - \mu_\chi$.

Качество обнаружения будем характеризовать пороговым ОСШ z_{mt} , которое определяется из решения системы уравнений

$$\begin{cases} \alpha_m(c, z_{mt}) = p, \\ \beta_m(c, z_{mt}) = p. \end{cases}$$

Тогда параметр скрытности передаваемой информации равен

$$\varphi = z_{mt}/z_{0t}. \quad (19)$$

Численные расчеты по формулам (6), (17) – (19) показали, что величина параметра скрытности не зависит от требуемого значения вероятностей ошибок p .

На рис. 4 штриховыми линиями показаны зависимости параметра (19) от k при минимальной длительности сигнала (кривая 1), максимальной длительности (кривая 2) и при $\kappa_0 = \kappa_{\min}, \chi_0 = \chi_{\min}$ или $\kappa_0 = \kappa_{\max}, \chi_0 = \chi_{\max}$ (кривая 3). При расчете кривых предполагалось, что длины априорных интервалов моментов появления и исчезновения одинаковы, то есть $\eta_\kappa = \eta_\chi = (k - 1)/2k$.

Как видно из рис. 4, применение сторонним наблюдателем максимально правдоподобного обнаружителя вместо квазиправдоподобного приводит к уменьшению параметра скрытности, то есть снижает скрытность передаваемой информации. Тем не менее при одинаковых отношениях сигнал/шум вероятность ошибок обнаружения сигнала сторонним наблюдателем оказывается существенно выше вероятностей ошибок наблюдателя, которому адресовано сообщение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Акимов П.С. Теория обнаружения сигналов / П.С. Акимов, П.А. Бакут, В.А. Богданович [и др.]; под ред. П.А. Бакута. — М.: Радио и связь, 1984. — 440 с.
- [2] Тихонов В.И. Оптимальный приём сигналов / В. И. Тихонов. — М.: Радио и связь, 1983. — 320 с.
- [3] Трифонов А.П. Оптимальный приём прямоугольного импульса с неизвестными моментами появления и исчезновения / А.П. Трифонов, Ю.Э. Корчагин // Известия вузов. Радиофизика. — 2000, Т. 43, № 3. — С. 271–282.
- [4] Захаров А.В. Оценка параметров скачкообразного случайного возмущения с неизвестным моментом появления / А.В. Захаров // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Физика, математика. — 2008. — № 1. — С. 17–28.
- [5] Трифонов А.П. Статистические свойства высоты и положения абсолютного максимума марковского случайного процесса типа Башелье / А.П. Трифонов, Ю.Э. Корчагин, М.Б. Беспалова // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Физика, математика. — 2014. — № 4. — С. 54–65.

REFERENCES

- [1] Akimov I.S., Bakut P.A., Bogdanovich V.A. et. al. Theory of detection of signals. [Akimov I.S., Bakut P.A., Bogdanovich V.A. i dr. Teoriya obnaruzheniya signalov]. Moscow: Radio and communications, 1984, 440 p.
- [2] Tihonov V.I. Optimal reception of signals. [Tihonov V.I. Optimalnyi priyem signalov]. Moscow: Radio and communications, 1983, 320 p.
- [3] Trifonov A.P., Korchagin Yu.E. Optimal receiving of the rectangular pulse with unknown appearance and disappearance moments. [Trifonov A.P., Korchagin Yu.E. Optimalnyi priem pryamougolnogo impulsa s neizvestnymi momentami poyavleniya i ischeznoeniya]. *Izvestiya vuzov. Radiofizika — Radioelectronics and Communications Systems*, 2000, vol. 43, no. 3, pp. 271–282.
- [4] Zaharov A.V. Parameter estimation hopping random disturbance with unknown appearance. [Zaharov A.V. Ocenka parametrov skachkoobraznogo sluchainogo vozmuscheniya s neizvestnymi momentom poyavleniya]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika. Matematika — Proceedings of Voronezh State University. Series: Physics. Mathematics*, 2008, no. 1, pp. 17–28.
- [5] Trifonov A.P., Korchagin Yu.E., Bepalova M.B. Statistical properties of height and provisions of absolute maximum markov processes Bachelier type. [Trifonov A.P. Statisticheskie svoistva vysoty i polozeniya absolyutnogo maksimuma markovskogo sluchainogo processa tipa Bashel'e]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika. Matematika — Proceedings of Voronezh State University. Series: Physics. Mathematics*, 2014, no. 4, pp. 54–65.

Трифонов Андрей Павлович, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, зав. каф. радиофизики ВГУ, г. Воронеж, профессор кафедры радиотехнических приборов и антенных систем НИУ «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация
E-mail: trifonov@phys.vsu.ru
Тел.: (473) 220-89-16.

Trifonov Andrei Pavlovich, Doctor of technical sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Head of the Department of Radiophysics of Voronezh State University, Voronezh, Professor Department of Radio Engineering Devices and Antenna Systems of National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Russian Federation
E-mail: trifonov@phys.vsu.ru
Tel.: (473) 220-89-16.

*Корчагин Юрий Эдуардович, доктор физико-математических наук, доцент, доцент каф. радиофизики ВГУ, г. Воронеж, доцент кафедры радиотехнических приборов и антенных систем НИУ «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация
E-mail: korchagin@phys.vsu.ru
Тел.: (473) 220-89-16*

*Korchagin Yurii Eduardovich, Doctor of physicomathematical sciences, Associate Professor of the Department of radiophysic of Voronezh State University. Voronezh, Associate Professor Department of Radio Engineering Devices and Antenna Systems of National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Russian Federation
E-mail: korchagin@phys.vsu.ru
Tel.: (473) 220-89-16*