



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.12.4>

УДК: 621.391

АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ОДИНОЧНОГО И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ С НЕИЗВЕСТНЫМИ МОМЕНТАМИ ПОЯВЛЕНИЯ И ИСЧЕЗНОВЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ПОМЕХ

Т.Т. Доан, П.А. Трифонов

Воронежский государственный университет
394018, г. Воронеж, ул. Университетская площадь, д. 1

Статья поступила в редакцию 19 сентября 2024 г.

Аннотация. Разработаны алгоритмы обнаружения одиночного и последовательности сверхширокополосных сигналов с неизвестными моментами появления и исчезновения, принимаемых на фоне помех. Найдены статистические характеристики синтезированных алгоритмов обнаружения сигналов и исследована эффективность их функционирования.

Ключевые слова: гауссовская узкополосная помеха, квазиправдоподобный, момент появления и исчезновения, сверхширокополосный сигнал, уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова.

Автор для переписки: Доан Тхе Туан, doanthetuan3007@gmail.com

Введение

В настоящее время в развитых иностранных государствах широко используются в радиоэлектронных системах сверхширокополосные сигналы (СШПС), которые могут обеспечивать высокую информативность и устойчивость функционирования [1-3]. Одновременно в последние годы большое число

прикладных задач радиофизики, радиолокации и связи, посвященных приеме сигналов с неизвестными моментами появления и исчезновения (МПИ) [4,5].

В [5,6] рассмотрена задача обнаружения одиночного СШПС с неизвестными МПИ, принимаемых на фоне гауссовских узкополосных помех (ГУП) и гауссовского белого шума (ГБШ) и разработаны квазиправдоподобные (КП) алгоритмы обнаружения. Однако анализ эффективности функционирования синтезированных в [5,6] алгоритмов был выполнен лишь приближенно. Кроме этого, до сих пор практически отсутствуют работы анализа синтезированных алгоритмов обнаружения последовательности СШПС с неизвестными МПИ, принимаемых на фоне помех.

В связи с этим рассмотрим задачу разработки алгоритмов обнаружения одиночного и последовательности СШПС с неизвестными МПИ, принимаемых на фоне ГУП и ГБШ.

1. Обнаружение одиночного СШПС с неизвестным МПИ

Пусть на интервале наблюдения $[0, T]$ подлежит обнаружению одиночного СШПС в виде:

$$s(t, \theta_{01}, \theta_{02}) = \begin{cases} f(t), \theta_{01} \leq t \leq \theta_{02}, \\ 0, t < \theta_{01}, t > \theta_{02}. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $f(t)$ – форма СШПС, θ_{01} и θ_{02} – соответственно моменты появления и исчезновения, которые могут принимать значения из априорных интервалов:

$$\theta_{01} \in [\theta_{1\min}, \theta_{1\max}], \theta_{02} \in [\theta_{2\min}, \theta_{2\max}]. \quad (2)$$

Будем также считать, что $0 \leq \theta_{1\min} \leq \theta_{2\max} \leq T$, $f(\theta_{0i}) \neq 0$, $i = 1, 2$.

Пусть на интервале времени $[0, T]$ в случае наличия сигнала (гипотеза H_1) наблюдается реализация: $x(t) = s(t, \theta_{01}, \theta_{02}) + n(t) + \xi(t)$, а в случае отсутствия сигнала (гипотеза H_0): $x(t) = n(t) + \xi(t)$. Здесь $n(t)$ – реализация ГБШ

с односторонней спектральной плотностью N_0 , $\xi(t)$ – ГУП, которая имеет корреляционную функцию:

$$B_{\xi}(t_2 - t_1) = \sum_{j=1}^K B_{j\xi}(t_2 - t_1), j = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

В частном случае, спектральную плотность ГУП можно представить в виде [5,7]:

$$G_{\xi}(\omega) = \sum_{j=1}^K \frac{\gamma_j}{2} \left[I\left(\frac{\omega_{0j} - \omega}{\Omega_j}\right) + I\left(\frac{\omega_{0j} + \omega}{\Omega_j}\right) \right], \quad (4)$$

где ω_{0j} – центральная частота, Ω_j – ширина полосы частот ГУП, γ_j – интенсивность

$$\text{ГУП, } I(x) = \begin{cases} 1, & |x| < 1/2 \\ 0, & |x| > 1/2 \end{cases}.$$

Используем КП алгоритм обнаружения при априорной неопределенности относительно формы сигнала и МПИ [8]. В этом случае приемник должен формировать решающую статистику:

$$L(\theta_1, \theta_2) = \frac{2}{N_0} \int_{\theta_1}^{\theta_2} [x(t) - g(t)/2] g(t) dt, \quad (5)$$

для всех возможных МПИ из области (2) и формы сигнала $g(t)$. Величину максимума функционала отношения правдоподобия (ФОП) (5) запишем как:

$$L_g = \sup L(\theta_1, \theta_2). \quad (6)$$

Решение в пользу одной из гипотез выносится в результате сравнения (6) с порогом:

$$L_{g < H_0} >^{H_1} h. \quad (7)$$

Поскольку L_g (7) является гауссовской случайной величиной (СВ), для вероятностей ошибки 1-го рода α и ошибки 2-го рода β можно записать [9,10]:

$$\alpha = P(L_g > h | H_0) = 1 - P_0(h), \quad (8)$$

$$\beta(\theta_{01}, \theta_{02}) = P(L_g < h | H_1) = P_1(h). \quad (9)$$

Для того, чтобы снизить трудности в технической реализации приемника, представим логарифм ФОП (5) как сумму двух статистически независимых гауссовских случайных процессов (СП):

$$L(\theta_1, \theta_2) = L_1(\theta_1) + L_2(\theta_2), \quad (10)$$

$$L_1(\theta_1) = \frac{2}{N_0} \int_{\theta_1}^{\theta} [x(t) - g(t)/2] g(t) dt, \quad (11)$$

$$L_2(\theta_2) = \frac{2}{N_0} \int_{\theta}^{\theta_2} [x(t) - g(t)/2] g(t) dt, \quad (12)$$

где θ – произвольная точка, принадлежащая интервалу $(\theta_{1\max}, \theta_{2\min})$. Тогда (7) представим в виде:

$$L_g = L_1 + L_2. \quad (13)$$

Здесь $L_1 = \sup L_1(\theta_1)$ и $L_2 = \sup L_2(\theta_2)$.

Полагаем, что опорный и принимаемый сигнал совпадают ($f(t) = g(t)$).

Для получения характеристики КП обнаружителя рассмотрим статистическое описание логарифма ФОП (11), (12).

Находим математические ожидания СВ (13) в виде:

$$S_i(\theta_i) = \langle L_i(\theta_i) \rangle = a_i S_i(\theta_{0i}, \theta_i) - S_i(\theta_i, \theta_i)/2, \quad (14)$$

и корреляционные функции:

$$B_i(\theta_{1i}, \theta_{2i}) = S_i(\theta_{1i}, \theta_{2i}) + \sigma^2/2, \quad (15)$$

где σ^2 – дисперсия, определяющаяся выражением:

$$\sigma^2 = \frac{4}{N_0^2} \int_{\theta_i}^{\theta_{2i}} \int_{\theta_i}^{\theta_{2i}} B_{\xi}(t_2 - t_1) f(t_1) f(t_2) dt_1 dt_2. \quad (16)$$

В случае, когда $\omega < \omega_{0j} - \Omega_j/2$ или $\omega > \omega_{0j} + \Omega_j/2$, запишем (16): $\sigma^2 = 0$, а если $\omega_{0j} - \Omega_j/2 < \omega < \omega_{0j} + \Omega_j/2$ получаем дисперсию:

$$\sigma^2 = q \left[\frac{2}{N_0} \int_{\theta_i}^{\theta_{2i}} f^2(t) dt \right] = qS(\theta_{1i}, \theta_{2i}). \quad (17)$$

Здесь q – отношение помеха-шум (ОПШ), которое определяется выражением:

$$q = \sum_{j=1}^K \gamma_j / N_0. \quad (18)$$

Далее поставим (17) в (15), перепишем корреляционные функции как:

$$B_i(\theta_{1i}, \theta_{2i}) = (1 + q)S_i(\theta_{1i}, \theta_{2i}) = \chi_1 S_i(\theta_{1i}, \theta_{2i}). \quad (19)$$

Здесь коэффициент χ_1 показывает снижение эффективности обнаружения одиночного СШПС с неизвестными МПИ вследствие воздействия ГУП и в (19) использованы следующие обозначения:

$$S_1(\theta_{11}, \theta_{21}) = \frac{2}{N_0} \int_{\max(\theta_{11}, \theta_{21})}^{\theta} f^2(t) dt, \quad (20)$$

$$S_2(\theta_{12}, \theta_{22}) = \frac{2}{N_0} \int_{\theta}^{\min(\theta_{12}, \theta_{22})} f^2(t) dt. \quad (21)$$

Для нахождения характеристики КП алгоритма введем в рассмотрение функцию:

$$Q(\theta_1, \theta_2) = \frac{2}{N_0} \int_{\theta_1}^{\theta_2} f^2(t) dt. \quad (22)$$

Пусть $f(t)$ может обращаться в ноль только на части интервала $[\theta_1, \theta_2]$, имеющей нулевую меру. Тогда применив (22), перепишем (20) и (21) следующим образом:

$$S_1(\theta_{11}, \theta_{21}) = \min[Q(\theta_{11}, \theta), Q(\theta_{21}, \theta)], \quad (23)$$

$$S_2(\theta_{12}, \theta_{22}) = \min[Q(\theta, \theta_{12}), Q(\theta, \theta_{22})]. \quad (24)$$

Перейдем в (11) от θ_1 к новой переменной $\lambda_1 = Q(\theta_1, \theta)$, $\lambda_1 \in [\lambda_{1\min}, \lambda_{1\max}]$, $\lambda_{1\min} = Q(\theta_{1\max}, \theta)$, $\lambda_{1\max} = Q(\theta_{1\min}, \theta)$, а в (12) – от θ_2 к новой переменной $\lambda_2 = Q(\theta_2, \theta)$, $\lambda_2 \in [\lambda_{2\min}, \lambda_{2\max}]$, $\lambda_{2\min} = Q(\theta_{2\min}, \theta)$, $\lambda_{2\max} = Q(\theta_{2\max}, \theta)$. Тогда можем записать (11), (12) как:

$$L_i(\lambda_i) = L_i(Q_i(\lambda_i)) = \mu_i(\lambda_i) = a_i \min(\lambda_{0i}, \lambda_i) - \lambda_i/2 + \nu_i(\lambda_i), \quad (25)$$

где $Q_i(\lambda_i)$ – решение уравнения, $\nu_i(\lambda_i)$ – статистически независимые гауссовские СП, для которых:

$$\langle \nu_i(\lambda_i) \rangle = 0, \langle \nu_i(\lambda_{1i}) \nu_i(\lambda_{2i}) \rangle = \chi_1 \min(\lambda_{1i}, \lambda_{2i}). \quad (26)$$

Используя представление логарифма ФОП (10), запишем:

$$P_i(h) = P\{[L_1(\theta_1) + L_2(\theta_2)] < h | H_i\} = \int_{-\infty}^{+\infty} F_{2i}(h-x) dF_{1i}(x), \quad (27)$$

$i = 1, 2$

Здесь:

$$\begin{aligned} F_{ij}(u) &= P\left[\sup L_i(\theta_i) < u, \theta_{i,\min} \leq \theta_i \leq \theta_{i,\max} \mid H_i\right] = \\ &= P\left[\sup \mu_i(\lambda_i) < u, \lambda_{i,\min} \leq \lambda_i \leq \lambda_{i,\max} \mid H_i\right] \end{aligned} \quad (28)$$

– функция распределения величин абсолютных максимумов СП $L_i(\theta_i)$ [8,11].

В случае, когда сигнал отсутствует, запишем:

$$F_{i0}(u) = \int_{-\infty}^u W_i(y, \lambda_{i,\max}) dy, \quad (29)$$

где $W_i(y, \lambda_i)$ – решение уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова.

Используя метод отражения с переменной знака [12], находим решение уравнения (29):

$$\begin{aligned} W_i(y, \lambda_{i,\min}) &= \frac{\exp\left[y/2\chi_1 - (\lambda_i - \lambda_{i,\min})/8\chi_1\right]}{\sqrt{2\pi\chi_1(\lambda_i - \lambda_{i,\min})}} \times \\ &\times \int_0^\infty \frac{\exp\left[-(u - \xi - \lambda_{i,\min}/2)^2/2\chi_1\lambda_{i,\min}\right]}{\sqrt{2\chi_1\pi\lambda_{i,\min}}} \times \\ &\times \exp(-\xi/2\chi_1) \times \left[\exp\left(-\frac{(y - \xi)^2}{2\chi_1(\lambda_i - \lambda_{i,\min})}\right) - \exp\left(-\frac{(y + \xi)^2}{2\chi_1(\lambda_i - \lambda_{i,\min})}\right) \right] d\xi. \end{aligned} \quad (30)$$

Подставляя $\lambda_i = \lambda_{i,\max}$ в (30), а затем (30) в выражение (29), получаем:

$$\begin{aligned} F_{i0}(u) &= \frac{1}{\sqrt{2\chi_1\pi\lambda_{i,\min}}} \int_0^\infty \exp\left[-(u - \xi - \lambda_{i,\min}/2)^2/2\chi_1\lambda_{i,\min}\right] \times \\ &\times \phi(\chi_1, \lambda_{i,\max} - \lambda_{i,\min}, \xi) d\xi. \end{aligned} \quad (31)$$

Здесь функция $\phi(y_1, y_2, y_3)$ определяется как:

$$\phi(y_1, y_2, y_3) = \Phi\left(\frac{y_1\sqrt{y_2}}{2} + \frac{y_3}{y_1\sqrt{y_2}}\right) - \exp(-y_3)\Phi\left(\frac{y_1\sqrt{y_2}}{2} - \frac{y_3}{y_1\sqrt{y_2}}\right), \quad (32)$$

где $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp(-\frac{t^2}{2}) dt$ – интеграл вероятности.

Подставляя (31) в (27), а затем (27) в (8), находим точное выражение для вероятности ложной тревоги:

$$\alpha = 1 - \frac{1}{\chi_1 \sqrt{2\pi} z_{\min}^2} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{(\xi_1 + \xi_2 - h - z_{\min}^2/2)}{\sqrt{\chi_1 z_{\min}}} \exp\left[-\frac{(\xi_1 + \xi_2 - h - z_{\min}^2/2)^2}{2\chi_1 z_{\min}^2}\right] \times \quad (33)$$

$$\times \phi(\chi_1, \eta_1, \xi_1) \phi(\chi_1, \eta_2, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2,$$

где $z_{\min}^2 = Q(\theta_{1,\max}, \theta_{2,\min})$, $\eta_i = Q(\theta_{i,\max}, \theta_{i,\min})$.

Найдем аналогичным образом точное выражение для вероятности пропуска:

$$\beta(\theta_{01}, \theta_{02}) = \frac{1}{2\pi \sqrt{2\pi\mu_1\mu_2} (\chi_1 z_{\min}^2)^{3/2}} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \exp\left[-\frac{(\xi_1 + \xi_3 - h + z_{\min}^2/2)^2}{2\chi_1 z_{\min}^2}\right] \times \quad (34)$$

$$\times \left[\exp\left(-\frac{(\xi_1 - \xi_2)^2}{2\chi_1\mu_1}\right) - \left(-\frac{(\xi_1 + \xi_2)^2}{2\chi_1\mu_1}\right) \right] \phi(\chi_1, m_1, \xi_2) \phi(\chi_1, m_2, \xi_4) \times$$

$$\times \left[\exp\left(-\frac{(\xi_3 - \xi_4)^2}{2\chi_1\mu_2}\right) - \left(-\frac{(\xi_3 + \xi_4)^2}{2\chi_1\mu_2}\right) \right] (\xi_1 + \xi_3 - h + z_{\min}^2/2) \times$$

$$\times \exp[(\xi_1 - \xi_2 + \xi_3 - \xi_4)/2\chi_1] \exp[-(\mu_1 + \mu_2)/8\chi_1] d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3 d\xi_4.$$

Здесь $m_1 = Q(\theta_{1,\min}, \theta_{01})$, $m_2 = Q(\theta_{02}, \theta_{2,\max})$, $\mu_1 = Q(\theta_{01}, \theta_{1,\max})$, $\mu_2 = Q(\theta_{2,\min}, \theta_{02})$.

Если известны априорные вероятности гипотез $p_i = P(H_i)$, $i = 0, 1$, то качество обнаружения можно характеризовать условной средней вероятностью ошибки [8] КП алгоритма (7):

$$P(\theta_{01}, \theta_{02}) = p_0 \alpha + p_1 \beta(\theta_{01}, \theta_{02}). \quad (35)$$

В качестве примера СШПС рассмотрим обнаружение СШПС вида импульса Гаусса:

$$f(t) = A \exp(-\frac{\pi t^2}{2\tau^2}), \quad (36)$$

где τ – длительность импульсов, с изменением τ меняется положение максимума спектра.

Для обнаружения СШПС с неизвестным МПИ перепишем (36) в виде:

$$f(t) = A \exp \left[-\frac{\pi(t-\theta)^2}{2\tau^2} \right]. \quad (37)$$

Здесь θ – середина отрезка МПИ $[\theta_{1\min}, \theta_{2\max}]$. Выберем априорные области МПИ (2) так, чтобы $\theta_{1\min}$ и $\theta_{2\max}$ были фиксированными и обозначим:

$$\theta = \frac{(\theta_{1\min} + \theta_{2\max})}{2}. \quad (38)$$

Положим, что $\theta_{1\max}, \theta_{2\min}$ располагаются симметрично относительно θ , то есть $\theta_{2\min} - \theta = \theta - \theta_{1\max}$, величина $k = T_{\max}/T_{\min}$, $T_{\max} = \theta_{2\max} - \theta_{1\min}$, $T_{\min} = \theta_{2\min} - \theta_{1\max}$, длительность импульсов $\tau = T_{\max}/8$ и применительно к которому имеем:

$$m_i = (k-2)/2k, \quad \mu_i = 1/2k, \quad \eta_i = (k-1)/2k,$$

$$z_{\min}^2 = z_m^2 \left[\operatorname{erf} \left(\frac{4\sqrt{\pi}}{k} \right) \right],$$

где $z_m^2 = A^2 T_{\max} / 4N_0$.

На рис. 1. показаны зависимости условной средней вероятности ошибки КП обнаружения сигнала вида импульса Гаусса от ОПШ q для различных величин k . Выбраны $h = 0$, $z_m = 8$ и $p_0 = 0.7$.

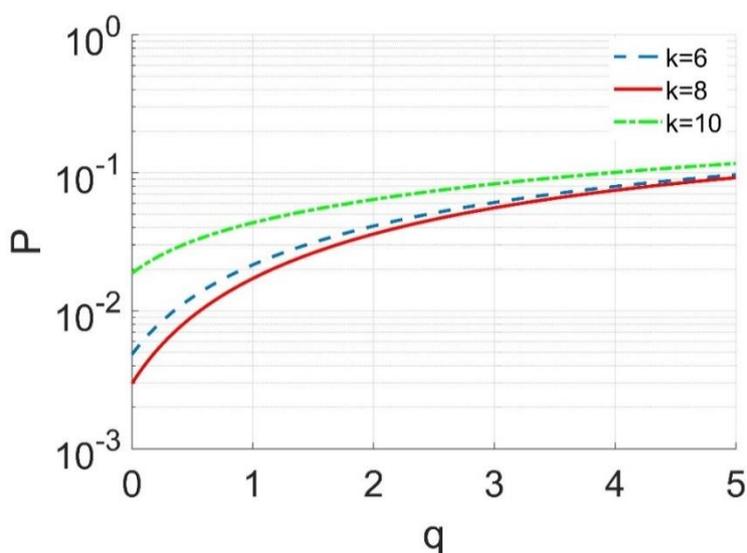


Рис. 1. Зависимости условной средней вероятности ошибки КП обнаружения сигнала от ОПШ q .

Анализируя зависимости, представленные на рис. 1. видим, что средняя вероятность ошибки КП обнаружения зависит от положения МПИ, а увеличение ОПШ q приводит к существенному увеличению средней вероятности ошибки КП обнаружения сигнала (7). Также показано, что вероятность ошибки КП обнаружения сигнала (7) меньше по сравнению с КП алгоритмом, найденным ранее.

2. Обнаружение последовательности СШПС с неизвестным МПИ

Последовательность СШПС представим в виде:

$$s_N(t, \theta_{01}, \theta_{02}, T_0) = \begin{cases} f_N(t, T_0), & \theta_{01} \leq t \leq \theta_{02}, \\ 0, & t < \theta_{01}, t > \theta_{02}. \end{cases} \quad (39)$$

Здесь θ_{01} и θ_{02} — соответственно МПИ, которые могут принимать значения из априорных интервалов:

$$\theta_i \in [\theta_{i \min}, \theta_{i \max}], i = 1, 2, \quad (40)$$

а форма сигнала $f_N(t)$ определяется выражением:

$$f_N(t, T_0) = \sum_{k=0}^{N-1} f[t - kT_0], \quad (41)$$

где N – количество импульсов в последовательности, T_0 – период повторения и $f(t)$ – форма одиночного СШПС.

Пусть на интервале времени $[0, T]$ в случае наличия сигнала наблюдается реализация: $x(t) = s_N(t, \theta_{01}, \theta_{02}, T_0) + n(t) + \xi(t)$, а в случае отсутствия сигнала: $x(t) = n(t) + \xi(t)$.

Предположим, что на приемной стороне неизвестны форма сигнала $f_N(t)$ и МПИ, а период повторения T_0 считаем априори известным.

Используем КП алгоритм для обнаружения последовательности СШПС с неизвестными МПИ. В этом случае приемник должен формировать логарифм ФОП для некоторых ожидаемых МПИ из области (40) и формы опорного сигнала $g_N(t)$:

$$L_s(\theta_1, \theta_2) = L_{s1}(\theta_1) + L_{s2}(\theta_2), \quad (42)$$

$$L_{s1}(\theta_1) = \frac{2}{N_0} \sum_{k=0}^{N-1} \int_{\theta_1}^{\theta} [x(t) - g(t - kT_0)/2] g(t - kT_0) dt, \quad (43)$$

$$L_{s2}(\theta_2) = \frac{2}{N_0} \sum_{k=0}^{N-1} \int_{\theta}^{\theta_2} [x(t) - g(t - kT_0)/2] g(t - kT_0) dt. \quad (44)$$

Здесь $g_N(t) = \sum_{n=0}^{N-1} g[t - nT_0]$.

Решение в пользу одной из гипотез выносится в результате сравнения с порогом величины максимума логарифма ФОП на априорной области (40):

$$L_s = \sup_{\substack{H_1 \\ < \\ H_0}} L_s(\theta_1, \theta_2) > h. \quad (45)$$

Предположим, что опорный и принимаемый сигнал имеют одинаковую форму ($f_N(t) = g_N(t)$), тогда для нахождения характеристики обнаружения введем в рассмотрение функцию:

$$Q(\theta_1, \theta_2) = \frac{2}{N_0} \sum_{k=0}^{N-1} \int_{\theta_1}^{\theta_2} f^2(t - kT_0) dt. \quad (46)$$

Найдем аналогичным образом (П.1) характеристики КП алгоритма обнаружения (45).

Выражение для вероятности ложной тревоги можно записать в виде:

$$\alpha = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi} \chi_2 z_{\min}^2} \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{(\xi_1 + \xi_2 - h - z_{\min}^2/2)}{z_{\min} \sqrt{\chi_2}} \exp\left[-\frac{(\xi_1 + \xi_2 - h - z_{\min}^2/2)^2}{2\chi_2 z_{\min}^2}\right] \times \quad (47)$$

$$\times \phi(\chi_2, \eta_1, \xi_1) \phi(\chi_2, \eta_2, \xi_2) d\xi_1 d\xi_2.$$

где $z_{\min}^2 = Q(\theta_{1,\max}, \theta_{2,\min})$, $\eta_i = Q(\theta_{i,\max}, \theta_{i,\min})$ и χ_2 – коэффициент снижения эффективности обнаружения при воздействии ГУП, определяющийся выражением:

$$\chi_2 = 1 + \frac{2}{N_0} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} B_\xi(t_2 - t_1) f_N(t_1) f_N(t_2) dt_1 dt_2 \Big/ \int_{\theta_1}^{\theta_2} f_N^2(t) dt. \quad (48)$$

Для упрощения вычисления значений (48) воспользуемся спектральными представлениями и представим (48) приближенным выражением:

$$\chi_2 = 1 + \sum_{j=1}^K \frac{\frac{\gamma_j}{N_0} \int_{\omega_{0j}-\Omega_j/2}^{\omega_{0j}+\Omega_j/2} |S_N(i\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |S_N(i\omega)|^2 d\omega} = 1 + \sum_{j=1}^K q_j \varepsilon_j. \quad (49)$$

Здесь:

$$\varepsilon_j = \frac{\int_{\omega_{0j}-\Omega_j/2}^{\omega_{0j}+\Omega_j/2} |S_N(i\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |S_N(i\omega)|^2 d\omega} = \frac{\int_{\omega_{0j}-\Omega_j/2}^{\omega_{0j}+\Omega_j/2} \left| S(i\omega) \sum_{k=0}^{N-1} \exp(-ik\omega T_0) \right|^2 d\omega}{\int_0^\infty \left| S(i\omega) \sum_{k=0}^{N-1} \exp(-ik\omega T_0) \right|^2 d\omega},$$

$$q_j = \frac{\gamma_j}{N_0},$$

где q_j – ОПШ для j -ой помехи $\xi_j(t)$, а ε_j – относительная доля энергии СШПС в полосе частот, пораженной j -ой помехой и $S(i\omega)$ – спектр одиночного СШПС.

Находим выражение для вероятности пропуска сигнала в виде:

$$\begin{aligned} \beta(\theta_{01}, \theta_{02}) = & \frac{1}{2\pi\chi_2 z_{\min}^3 \sqrt{2\pi\chi_2\mu_1\mu_2}} \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \exp\left[-\frac{(\xi_1 + \xi_3 - h + z_{\min}^2/2)^2}{2\chi_2 z_{\min}^2}\right] \times \\ & \times \left[\exp\left(-\frac{(\xi_1 - \xi_2)^2}{2\chi_2\mu_1}\right) - \left(-\frac{(\xi_1 + \xi_2)^2}{2\chi_2\mu_1}\right) \right] \phi(\chi_2, m_1, \xi_2) \phi(\chi_2, m_2, \xi_4) \times \\ & \times \left[\exp\left(-\frac{(\xi_3 - \xi_4)^2}{2\chi_2\mu_2}\right) - \left(-\frac{(\xi_3 + \xi_4)^2}{2\chi_2\mu_2}\right) \right] (\xi_1 + \xi_3 - h + z_{\min}^2/2) \times \\ & \times \exp[(\xi_1 - \xi_2 + \xi_3 - \xi_4)/2\chi_2] \exp[-(\mu_1 + \mu_2)/8\chi_2] d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3 d\xi_4. \end{aligned} \quad (50)$$

где $m_1 = Q(\theta_{1\min}, \theta_{01})$, $m_2 = Q(\theta_{02}, \theta_{2\max})$, $\mu_1 = Q(\theta_{01}, \theta_{1\max})$, $\mu_2 = Q(\theta_{2\min}, \theta_{02})$.

Полученные выражения (47), (50) для вероятностей ошибки обнаружения последовательности СШПС с неизвестными МПИ аналогичны выражениям (33), (34) для одиночного СШПС с той разницей, что вероятности ошибки обнаружения (47), (50) уменьшаются при увеличении количества импульсов в последовательности СШПС.

Заключение

Таким образом, найдены точные выражения для характеристик алгоритмов обнаружения одиночного СШПС с неизвестными МПИ, принимаемых на фоне помех. Также разработан алгоритм обнаружения последовательности СШПС с неизвестными МПИ при наличии помех.

Полученные результаты позволяют оценить количественные показатели эффективности обнаружения сигнала в различных условиях сигнально-помеховой обстановки.

Литература

1. Korchagin Y.E., Titov K.D., Zavalishina O.N. The Detection Characteristics of an Ultra-Wideband Quasi-Radio Signal with an Unknown Arrival Time //2021 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). – IEEE, 2021. – С. 1-5. <https://doi.org/10.1109/Dynamics52735.2021.9653712>
2. Le M. et al. Multivariate Signal Decomposition for Vital Signal Extraction using UWB Impulse Radar //2023 IEEE Statistical Signal Processing Workshop (SSP). – IEEE, 2023. – С. 290-294. <https://doi.org/10.1109/SSP53291.2023.10208009>
3. Wang Z. UWB Signal Generation and Transmission Technology // 2023 3rd International Conference on Electronic Information Engineering and Computer Science (EIECS). – IEEE, 2023. – С. 989-992. <https://doi.org/10.1109/EIECS59936.2023.10435495>
4. Korchagin Y. et al. Estimation of the initial phase of a radio signal with an arbitrary shape and unknown appearance and disappearance moments // 2022 4th international youth conference on radio electronics, electrical and power engineering (REEPE). – IEEE, 2022. – С. 1-6. <https://doi.org/10.1109/REEPE53907.2022.9731421>

5. Трифонов П.А. Эффективность обнаружения сверхширокополосного сигнала неизвестной формы с неизвестными моментами появления и исчезновения, принимаемого на фоне узкополосных помех и гауссовского белого шума / П. А. Трифонов, Н.Н. Ахмад // Радиотехника. – 2022. – Т. 86, № 2. – С. 48-57. <https://doi.org/10.18127/j00338486-202202-06>
6. Трифонов П.А., Доан Т.Т. Методика оценки степени влияния гауссовских узкополосных помех на эффективность обнаружения сверхширокополосных сигналов с неизвестными моментами появления и исчезновения при наличии гауссовского белого шума // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика. Математика. – 2021. – №. 2. – С. 32-41.
7. Радзиевский В.Г., Трифонов П.А. Обработка сверхширокополосных сигналов и помех. – Радиотехника, 2009.
8. Трифонов А.П., Корчагин Ю.Э. Прием сигналов с неизвестными моментами появления и исчезновения // Радиофизика. – 2017. – С. 4.
9. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. – 1983.
10. Бакут П.А. Теория обнаружения сигналов. – 1984.
11. Трифонов А.П. Обнаружение сигналов с неизвестными параметрами // Теория обнаружения сигналов. М.: Радио и связь. – 1984. – С. 12-89.
12. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. – 1977.

Для цитирования:

Доан Т.Т., Трифонов П.А. Алгоритм обнаружения одиночного и последовательности сверхширокополосных сигналов с неизвестными моментами появления и исчезновения при наличии помех. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.12.4>