

Методика оценки частотных параметров сверхширокополосных сигналов с неизвестной формой спектра при наличии помех

Т.Т. Доан, П.А. Трифонов

Воронежский государственный университет
394018, Россия, г. Воронеж,
Университетская пл., 1

Аннотация – Обоснование. Одной из актуальных задач обработки сверхширокополосных сигналов является оценка их частотных параметров в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки. **Цель.** В работе выполняются синтез и анализ алгоритма совместной оценки центральной частоты и полосы частот сверхширокополосных сигналов, принимаемых на фоне гауссовских узкополосных помех и гауссовского белого шума. **Методы.** В ходе исследования используются вычислительный метод статистической радиофизики и метод математической статистики. **Результаты.** Найдена характеристика совместной оценки центральной частоты и полосы частот сверхширокополосных сигналов, включая значения смещений и рассеяний оценки. Установлено, что с увеличением интенсивности помех точность совместной оценки снижается. **Заключение.** Полученные результаты позволяют сделать обоснованный выбор необходимого алгоритма оценки частотных параметров сверхширокополосных сигналов в зависимости от требований, предъявляемых к точности оценок в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки.

Ключевые слова – гауссовская узкополосная помеха; квазиравдоподобная оценка; максимальное правдоподобие; полоса частот; сверхширокополосный сигнал; центральная частота.

Введение

На сегодняшний день непрерывно продолжающееся развитие новых радиоэлектронных систем требует повышения пропускной способности, а при передаче информации по беспроводному каналу расширения их возможностей и улучшения качественных характеристик. Одним из возможных путей решения этой проблемы является использование сверхширокополосных (СШП) сигналов [1–8; 10–13]. В связи с этим во многих прикладных задачах необходимо решать задачи оценки параметров СШП-сигналов [7; 10; 12; 13], в том числе задачи оценки частотных параметров СШП-сигналов. В работе [7] выполнены синтез и анализ квазиравдоподобного (КП) алгоритма оценки частоты СШП-квазирасдосигнала с неизвестной длительностью, наблюдаемого на фоне гауссовского белого шума (ГБШ). В работе [10] выполнены синтез и анализ КП-алгоритма оценки средней частоты СШП-сигналов, принимаемых на фоне гауссовских узкополосных помех (ГУП) и ГБШ. В частности, существенный интерес вызывает задача совместной оценки центральной частоты и полосы частот СШП-сигналов с неизвестной формой спектра, принимаемых на фоне ГУП и ГБШ.

1. Алгоритм оценки частотных параметров СШП-сигналов при наличии ГУП и ГБШ

Пусть на фоне ГУП и ГБШ наблюдается СШП-сигнал $s(t, \Omega_1, \Omega_2)$, спектр которого можно представить в виде

$$s(\omega, \Omega_1, \Omega_2) = \begin{cases} q(\omega), \Omega_1 \leq \omega \leq \Omega_2, \\ 0, \omega < \Omega_1; \omega > \Omega_2. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь обозначим: Ω_1 – минимальная частота спектра; Ω_2 – максимальная частота спектра; $\nu = (\Omega_1 + \Omega_2)/2$ – центральная частота и $\Omega = (\Omega_2 - \Omega_1)$ – полоса частот. Значения Ω_1, Ω_2 могут принимать значения из априорных интервалов $\Omega_i \in [\Omega_{i \min}; \Omega_{i \max}]$, $i = 1, 2$.

Используя такие параметры СШП-сигналов, как центральная частота ν и полоса частот Ω , спектр (1) можно переписать следующим образом:

$$s(\omega, \nu, \Omega) = q(\omega) I\left[\frac{(\omega - \nu)}{\Omega}\right], \quad (2)$$

где

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

а ν и Ω могут принимать значения из соответствующих интервалов:

$$v \in [v_{\min}; v_{\max}], \quad \Omega \in [\Omega_{\min}; \Omega_{\max}]. \quad (3)$$

Тогда для принимаемого сигнала имеем

$$s(\omega, v, \Omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{v-\Omega/2}^{v+\Omega/2} q(\omega) \exp(j\omega t) d\omega. \quad (4)$$

Полагаем, что на интервале времени $[0, T]$ наблюдается реализация $x(t) = s(t, v_0, \Omega_0) + n(t) + \xi(t)$, где v_0, Ω_0 – истинные значения неизвестных центральной частоты и полосы частот; $n(t)$ – реализация ГБШ с односторонней спектральной плотностью N_0 ; $\xi(t)$ – ГУП с корреляционной функцией $B_\xi(t_2 - t_1)$. В частном случае спектральную плотность ГУП можно представить в виде [6; 10; 12]:

$$G_\xi(\omega) = \frac{\gamma}{2} \left[I \left(\frac{\omega_0 - \omega}{\Omega_\xi} \right) + I \left(\frac{\omega_0 + \omega}{\Omega_\xi} \right) \right], \quad (5)$$

где ω_0 – центральная частота ГУП; Ω_ξ – ширина полосы частот ГУП; γ – интенсивность ГУП.

Как известно [7; 10; 13], для оценки частотных параметров СШП-сигналов можем использовать КП-алгоритм оценки, согласно которому логарифм функционала отношения правдоподобия (ЛФОП) для некоторого ожидаемого сигнала (2) запишется в виде

$$L(v, \Omega) = \frac{2}{N_0} \int_0^T x(t) s_1(t, v, \Omega) dt - \frac{1}{N_0} \int_0^T s_1^2(t, v, \Omega) dt. \quad (6)$$

Здесь $s_1(t, v, \Omega)$ – опорный сигнал, причем в общем случае $s(t, v, \Omega) \neq s_1(t, v, \Omega)$. И находим КП-алгоритм оценки частотных параметров СШП-сигнала как $(\hat{v}, \hat{\Omega}) = \arg \sup L(v, \Omega)$. (7)

Если реализация наблюдаемых данных $x(t)$ не содержит ГУП $\xi(t)$ и $s(t, v, \Omega) = s_1(t, v, \Omega)$, то оценка (7) является оценкой максимального правдоподобия (ОМП).

Полагаем, что у ожидаемого сигнала $s_1(t, v, \Omega)$ спектр подобен спектру СШП-сигнала (2) и может быть записан как

$$s_1(\omega, v, \Omega) = q_1(\omega) I \left[(\omega - v) / \Omega \right]. \quad (8)$$

Переходя (6) к спектральному представлению, получим

$$L(v, \Omega) = \frac{1}{\pi N_0} \int_{v-\Omega/2}^{v+\Omega/2} q_1(\omega) x(\omega) d\omega - \frac{1}{2\pi N_0} \int_{v-\Omega/2}^{v+\Omega/2} |q_1(\omega)|^2 d\omega, \quad (9)$$

где

$$x(\omega) = \int_0^T x(t) \exp(-j\omega t) dt$$

– текущий (выборочный) спектр реализации наблюдаемых данных.

Согласно [10], КП-алгоритм оценки центральной частоты \hat{v} и полосы частот $\hat{\Omega}$ можно выразить через КП-алгоритм оценки минимальной $\hat{\Omega}_1$ и максимальной $\hat{\Omega}_2$ частот спектра: $\hat{v} = (\hat{\Omega}_1 + \hat{\Omega}_2) / 2$ и $\hat{\Omega} = \hat{\Omega}_2 - \hat{\Omega}_1$, согласно которому, необходимо найти оценки минимальной $\hat{\Omega}_1$ и максимальной $\hat{\Omega}_2$ частот спектра. В соответствии с [10; 14] находим КП-алгоритм оценки как

$$(\hat{\Omega}_1, \hat{\Omega}_2) = \arg \sup L(\Omega_1, \Omega_2), \quad (10)$$

$$L(\Omega_1, \Omega_2) = \frac{1}{\pi N_0} \int_{\Omega_1}^{\Omega_2} q_1(\omega) x(\omega) d\omega - \frac{1}{2\pi N_0} \int_{\Omega_1}^{\Omega_2} |q_1(\omega)|^2 d\omega, \quad (11)$$

ЛФОП (11) можно представить в виде

$$L(\Omega_1, \Omega_2) = L_1(\Omega_1) + L_2(\Omega_2), \quad (12)$$

$$L(\Omega_1) = \frac{1}{\pi N_0} \int_{\Omega_1}^{\Omega_f} q_1(\omega) x(\omega) d\omega - \frac{1}{2\pi N_0} \int_{\Omega_1}^{\Omega_f} |q_1(\omega)|^2 d\omega, \quad (13)$$

$$L(\Omega_2) = \frac{1}{\pi N_0} \int_{\Omega_f}^{\Omega_2} q_1(\omega) x(\omega) d\omega - \frac{1}{2\pi N_0} \int_{\Omega_f}^{\Omega_2} |q_1(\omega)|^2 d\omega, \quad (14)$$

где Ω_f – произвольное фиксированное значение частоты из интервала $[\Omega_{1\max}, \Omega_{2\min}]$.

Как известно [15], гауссовские спектральные меры на неперекрывающихся частотных интервалах ортогональны. Поэтому случайные процессы (СП) $L_1(\Omega_1)$ (13) и $L_2(\Omega_2)$ (14) будут статистически независимыми. В результате оценку (10) можно переписать как

$$\hat{\Omega}_i = \arg \sup L_i(\Omega_i), \quad i = 1, 2. \quad (15)$$

Рассмотрим статистические характеристики СП $L_1(\Omega_1)$ и $L_2(\Omega_2)$, которые, согласно (13), (14), представляют собой линейные преобразования СП $x(\omega)$ и, следовательно, являются гауссовскими. Для исследования статистических описаний находим их математические ожидания

$$S_1(\Omega_1) = \langle L_1(\Omega_1) \rangle = \frac{1}{\pi N_0} \int_{\max(\Omega_1, \Omega_{01})}^{\Omega_f} |q(\omega)q_1(\omega)| d\omega - \quad (16)$$

$$- \frac{1}{2\pi N_0} \int_{\Omega_1}^{\Omega_f} |q_1(\omega)|^2 d\omega,$$

$$S_2(\Omega_2) = \langle L_2(\Omega_2) \rangle = \frac{1}{\pi N_0} \int_{\Omega_f}^{\min(\Omega_2, \Omega_{02})} |q(\omega)q_1(\omega)| d\omega - \quad (17)$$

$$- \frac{1}{2\pi N_0} \int_{\Omega_f}^{\Omega_2} |q_1(\omega)|^2 d\omega$$

и корреляционные функции

$$B_1(\Omega_{11}, \Omega_{21}) = \quad (18)$$

$$= \left(1 + \frac{\gamma}{N_0}\right) \left[\frac{1}{\pi N_0} \int_{\max(\Omega_{11}, \Omega_{21})}^{\Omega_f} |q_1(\omega)|^2 d\omega \right],$$

$$B_2(\Omega_{12}, \Omega_{22}) = \quad (19)$$

$$= \left(1 + \frac{\gamma}{N_0}\right) \left[\frac{1}{\pi N_0} \int_{\Omega_f}^{\min(\Omega_{12}, \Omega_{22})} |q_1(\omega)|^2 d\omega \right].$$

Согласно [6; 10], математические ожидания (16), (17) достигают максимума в точке $\Omega_1 = \Omega_{01}$ и $\Omega_2 = \Omega_{02}$ соответственно. Положения максимумов математических ожиданий (16) и (17) совпадают с истинными значениями минимальной и максимальной частот сигнала (4) при выполнении условия

$$q_1(\Omega_{0i}) \leq 2q(\Omega_{0i}), \quad i = 1, 2.$$

Тогда КП-алгоритмы оценки (15) будут состоятельными.

Будем полагать, что отношение сигнал – шум (ОСШ) на выходе приемника достаточно велико, в этом случае положения максимумов СП $L_1(\Omega_1)$ и $L_2(\Omega_2)$ располагаются в малых окрестностях точек Ω_{01} и Ω_{02} , поэтому необходимо исследовать поведение СП (13) и (14) в окрестностях точек Ω_{01} и Ω_{02} . Полагая

$$\Delta = \max\left\{|\Omega_i - \Omega_{0i}|, |\Omega_j - \Omega_{0j}|\right\} \rightarrow 0, \quad i, j = 1, 2,$$

аппроксимируем средние значения (16) и (17) отрезками разложений Тейлора:

$$S_i(\Omega_i) = (-1)^i \left[\frac{1}{\pi N_0} \int_{\Omega_f}^{\Omega_{0i}} |q(\omega)q_1(\omega)| d\omega - \right. \quad (20)$$

$$\left. - \frac{1}{2\pi N_0} \int_{\Omega_f}^{\Omega_{0i}} |q_1(\omega)|^2 d\omega \right] - (-1)^i \rho_i^2 (\Omega_i - \Omega_{0i}) / 2\Omega_0 +$$

$$+ \rho_i^2 g(\Omega_{0i}) \min\left[0, (-1)^i (\Omega_i - \Omega_{0i})\right] / \Omega_0 + o(\Delta),$$

где

$$g(\omega) = q(\omega)/q_1(\omega), \quad \rho_i^2 = 2|q_1(\Omega_{0i})|^2 / N_0\pi, \quad i = 1, 2,$$

а корреляционные функции (18) и (19) перепишем в виде

$$B_1(\Omega_{11}, \Omega_{21}) = \left(1 + \frac{\gamma}{N_0}\right) \left\{ \frac{(-1)^{\Omega_{01}}}{\pi N_0} \int_{\Omega_f}^{\Omega_{01}} |q_1(\omega)|^2 d\omega + \right. \quad (21)$$

$$\left. + \rho_1^2 \min\left[(-1)(\Omega_{11} - \Omega_{01}); (-1)(\Omega_{21} - \Omega_{01})\right] / \Omega_0 \right\},$$

$$B_2(\Omega_{12}, \Omega_{22}) = \left(1 + \frac{\gamma}{N_0}\right) \left\{ \frac{1}{\pi N_0} \int_{\Omega_f}^{\Omega_{02}} |q_1(\omega)|^2 d\omega + \right. \quad (22)$$

$$\left. + \rho_2^2 \min\left[(\Omega_{12} - \Omega_{02}); (\Omega_{22} - \Omega_{02})\right] / \Omega_0 \right\},$$

где $\rho_1^2 = 2|q_1(\Omega_{01})|^2 / N_0\pi$ и $\rho_2^2 = 2|q_1(\Omega_{02})|^2 / N_0\pi$.

Как следует из (20), (21) и (22), в малых окрестностях точек Ω_{01} и Ω_{02} СП (13), (14) является гауссовским марковским СП диффузионного типа с коэффициентами сноса и диффузии [16]:

$$k_{11} = \frac{\rho_1^2}{2\Omega_0} \begin{cases} g_1, \Omega_1 > \Omega_{01}, \\ -1, \Omega_1 \leq \Omega_{01}, \end{cases} \quad (23)$$

$$k_{12} = \frac{\rho_1^2 \left(1 + \frac{\gamma}{N_0}\right)}{2\Omega_0},$$

$$k_{12} = \frac{\rho_2^2}{2\Omega_0} \begin{cases} g_2, \Omega_2 \leq \Omega_{02}, \\ -1, \Omega_2 > \Omega_{02}, \end{cases} \quad (24)$$

$$k_{22} = \frac{\rho_2^2 \left(1 + \frac{\gamma}{N_0}\right)}{2\Omega_0},$$

где $g_1 = 2g(\Omega_{01}) - 1$ и $g_2 = 2g(\Omega_{02}) - 1$.

Найдем совместную плотность вероятности распределений положений абсолютных максимумов реализаций СП $L_1(\Omega_1)$ и $L_2(\Omega_2)$:

$$W(\Omega_1, \Omega_2) = W_{1\Omega}(\Omega_1)W_{2\Omega}(\Omega_2), \quad (25)$$

где $W_{1\Omega}(\Omega_1)$ и $W_{2\Omega}(\Omega_2)$ – плотности вероятностей положений абсолютных максимумов реализаций СП $L_1(\Omega_1)$ и $L_2(\Omega_2)$.

Далее найдем совместную плотность вероятности нормированных ошибок совместных оценок.

Пусть

$$\mu_1 = \rho_1^2 g_1 (\hat{\Omega}_1 - \Omega_{01}) / 2, \quad \mu_2 = \rho_2^2 g_2 (\hat{\Omega}_2 - \Omega_{02}) / 2$$

– нормированные ошибки КП-алгоритма оценки нижней и верхней частот сигнала (4). Тогда в слу-

чае, когда ОСШ на выходе приемника достаточно велико, получим асимптотические выражения для плотностей вероятностей нормированных ошибок в виде

$$W_1(\mu_1) = \begin{cases} W_0(\mu_1/g_1)/g_1, & \mu_1 < 0, \\ g_1 W_0(\mu_1 g_1), & \mu_1 \geq 0, \end{cases} \quad (26)$$

$$W_2(\mu_2) = \begin{cases} g_2 W_0(\mu_2 g_2), & \mu_2 < 0, \\ W_0(\mu_2/g_2)/g_2, & \mu_2 \geq 0, \end{cases} \quad (27)$$

где

$$W_0(x) = 3 \exp(2|x|) \left[1 - \Phi \left(3\sqrt{\frac{|x|}{2}} \right) \right] + \Phi \left(\sqrt{\frac{|x|}{2}} \right) - 1 \quad (28)$$

– предельная плотность вероятности нормированной ошибки ОМП одного параметра сигнала при условии, что второй параметр известен, $g_i, i = 1, 2$. Согласно [9], плотность вероятности (28) существенно отличается от гауссовской.

Согласно (25), (26) и (27), совместная плотность вероятности нормированных ошибок КП-алгоритма оценки равна

$$W(\mu_1, \mu_2) = W_1(\mu_1)W_2(\mu_2). \quad (29)$$

Введем в рассмотрение нормированные ошибки КП-алгоритма оценки центральной частоты и полосы частот сигнала (4):

$$\eta_1 = (\hat{v} - v_0)\rho_1\rho_2/\Omega_0, \quad (30)$$

$$\eta_2 = (\hat{\Omega} - \Omega_0)\rho_1\rho_2/2\Omega_0. \quad (31)$$

Переходя в выражении (29) к новым переменным (30), (31), находим предельную двумерную плотность вероятности нормированных ошибок совместных оценок [14]:

$$W(\eta_1, \eta_2) = \frac{g_1 g_2}{2} W_1 \left(g_1 \frac{\eta_1 - \eta_2}{2} \right) W_2 \left(g_2 \frac{\eta_1 + \eta_2}{2} \right). \quad (32)$$

Совместная плотность вероятности (32) позволяет рассчитать асимптотические значения смещений и рассеяний КП-алгоритма оценки \hat{v} и $\hat{\Omega}$:

$$b(\hat{v}|v_0, \Omega_0) = \langle \hat{v} - v_0 \rangle = 3(1+q)\Omega_0(g_1^{-2} - g_2^{-2})/4(\rho_1\rho_2)^2, \quad (33)$$

$$b(\hat{\Omega}|v_0, \Omega_0) = \langle \hat{\Omega} - \Omega_0 \rangle = 3(1+q)\Omega_0(2 - g_1^{-2} - g_2^{-2})/2(\rho_1\rho_2)^2, \quad (34)$$

$$V_1(\hat{v}|v_0, \Omega_0) = \langle (\hat{v} - v_0)^2 \rangle = \frac{13(1+q)\Omega_0^2}{4(\rho_1\rho_2)^4} \left(\frac{g_1 + g_1^{-1}}{g_1^2} + \frac{g_2 + g_2^{-1}}{g_2^2} \right), \quad (35)$$

$$V_1(\hat{\Omega}|v_0, \Omega_0) = \langle (\hat{\Omega} - \Omega_0)^2 \rangle = \quad (36)$$

$$= \frac{13(1+q)\Omega_0^2}{(\rho_1\rho_2)^4} \left(\frac{g_1 + g_1^{-1}}{g_1^2} + \frac{g_2 + g_2^{-1}}{g_2^2} \right).$$

Здесь $q = \gamma/N_0$ – отношение помеха – шум.

Видно, что можно рассчитать значения смещений и рассеяний ОМП центральной частоты и полосы частот при $g_1 = g_2 = 1$ в условии отсутствия помех ($q = 0$), и имеем

$$b(\hat{v}|v_0, \Omega_0) = 0, \quad (37)$$

$$b(\hat{\Omega}|v_0, \Omega_0) = 0, \quad (38)$$

$$V(\hat{v}|v_0, \Omega_0) = \frac{13\Omega_0^2}{(\rho_1\rho_2)^4}, \quad (39)$$

$$V(\hat{\Omega}|v_0, \Omega_0) = \frac{52\Omega_0^2}{(\rho_1\rho_2)^4}. \quad (40)$$

2. Влияние ГУП на точность оценки частотных параметров СШП-сигналов

В качестве примера исследования рассмотрим опорный сигнал со спектром прямоугольной формы:

$$q_1(\omega) = a_1,$$

принимаемый СШПС с прямоугольной формой спектра со скошенной вершиной:

$$q(\omega) = a \left[1 + 2 \frac{\omega - v_0}{\Omega_0} \left(\frac{1-k}{1+k} \right) \right].$$

Здесь параметры a , a_1 – интенсивности сигналов и k характеризует наклон вершины спектра СШП-сигнала.

В этом случае можно записать величины g_1 и g_2 как

$$g_1 = [k(4\alpha - 1) - 1]/(1+k), \quad (41)$$

$$g_2 = (4\alpha - k - 1)/(1+k), \quad (42)$$

где $\alpha = a/a_1$ – отношение интенсивностей принимаемого и опорного сигналов.

Проигрыш в точности КП-алгоритма оценки по сравнению с точностью ОМП будем характеризовать отношением их рассеяний, которое можно записать как

$$\chi = \frac{V_1(\hat{v}|v_0, \Omega_0)}{V(\hat{v}|v_0, \Omega_0)} = \frac{V_1(\hat{\Omega}|v_0, \Omega_0)}{V(\hat{\Omega}|v_0, \Omega_0)} = \left(\frac{1+q}{4} \right) \left(\frac{g_1 + g_1^{-1}}{g_1^2} + \frac{g_2 + g_2^{-1}}{g_2^2} \right). \quad (43)$$

Здесь значения g_1 , g_2 определяются из (41), (42).

На рис. приведены зависимости проигрыша в точности КП-алгоритма оценки по сравнению с точностью ОМП (43) от параметра k , характери-

зующего наклон вершины спектра СШП-сигнала для различных значений отношения помеха – шум q при $\alpha = 1$.

При анализе зависимостей, представленных на рис., видно, что в случае, когда значение $k \leq 1$, проигрыш в точности КП-алгоритма оценки уменьшается при увеличении значений k , характеризующих наклон вершины спектра СШП-сигнала, и проигрыш возрастает с увеличением значений k в случае, когда значение $k > 1$. Также увидим, что проигрыш в точности КП-алгоритма оценки возрастает с увеличением значений отношения помеха – шум q . Так, в случае, когда значение $k = 1$ рассеяние КП-алгоритма оценки больше рассеяния ОМП в 1,5 раза при $q = 0,5$, в 2,5 раза при $q = 1,5$ и в 3,5 раза при $q = 2,5$.

Заключение

Выполнены синтез и анализ алгоритма совместной оценки центральной частоты и полосы частот СШП-сигналов, принимаемых на фоне ГУП и ГБШ. Исследовано влияние ГУП на точность этой оценки, и показано, что точность оценки снижается с увеличением интенсивности помех.

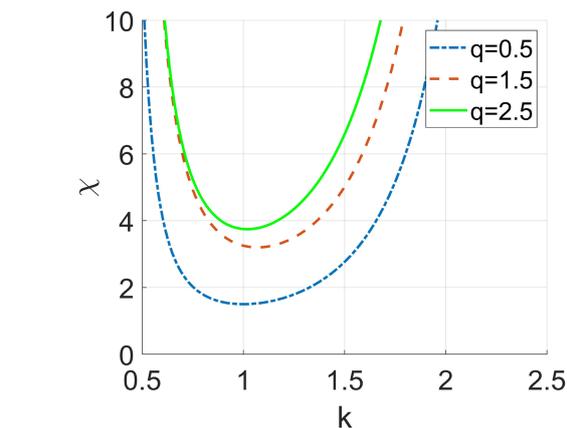


Рис. Зависимости проигрыша в точности КП-алгоритма оценки по сравнению с точностью ОМП от параметра, характеризующего наклон вершины спектра СШП сигнала
Fig. Dependences of the loss in accuracy of the quasi-likelihood estimate compared to the accuracy of the maximum likelihood estimate on the parameter characterizing the slope of the peak of the spectrum of the UWB signal

Полученные результаты позволяют сделать обоснованный выбор необходимого алгоритма оценки частотных параметров СШП-сигналов в зависимости от требований, предъявляемых к точности оценок в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки.

Список литературы

1. Multivariate signal decomposition for vital signal extraction using UWB impulse radar / M. Le [et al.] // 2023 IEEE Statistical Signal Processing Workshop (SSP). 2023. P. 290–294. DOI: <https://doi.org/10.1109/SSP53291.2023.10208009>
2. Wang Z. UWB signal generation and transmission technology // 2023 3rd International Conference on Electronic Information Engineering and Computer Science (EIECS). 2023. P. 989–992. DOI: <https://doi.org/10.1109/EIECS59936.2023.10435495>
3. Формирование сверхкоротких импульсов с помощью сумматора конструкции Уилкинсона / А.М. Бобрешов [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2021. Т. 24, № 4. С. 46–52. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2021.24.4.46-52>
4. Веденькин Д.А., Седельников Ю.Е. Свойства и технические приложения антенных решеток, сфокусированных по широкополосному сигналу // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2023. Т. 26, № 4. С. 88–94. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.4.88-94>
5. Любавский А.П., Разиньков С.Н. Классификация, области применения и перспективы развития систем радиосвязи со сверхширокополосными сигналами // Информатика: проблемы, методология, технологии: сб. мат. XVIII Межд. науч.-мет. конф. Воронеж, 8–9 февраля 2018 г. Воронеж: Научно-исследовательские публикации, 2018. Т. 6. С. 22–26. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35580257>
6. Радзиевский В.Г., Трифонов П.А. Обработка сверхширокополосных сигналов и помех. М.: Радиотехника, 2009. 288 с.
7. Корчагин Ю.Э., Титов К.Д., Завалишина О.Н. Квазиравнодоподобный алгоритм оценки частоты сверхширокополосного квазиреального сигнала с неизвестной длительностью // Журнал радиоэлектроники. 2023. № 8. DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.8.9>
8. Estimation of the initial phase of a radio signal with an arbitrary shape and unknown appearance and disappearance moments / Yu. Korchagin [et al.] // 2022 4th international youth conference on radio electronics, electrical and power engineering (REEPE). 2022. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/REEPE53907.2022.9731421>
9. Куликов Е.И., Трифонов А.П. Оценка параметров сигналов на фоне помех. М.: Сов. радио, 1978. 296 с.
10. Трифонов П.А., Доан Т.Т. Влияние гауссовских узкополосных помех на точность оценки средней частоты сверхширокополосных сигналов // Теория и техника радиосвязи. 2024. № 3. С. 29–34. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=72444873>
11. Трифонов П.А. Влияние узкополосных помех на пороговые характеристики оценки параметров сверхширокополосных сигналов // Радиотехника. 2007. № 7. С. 33–36.
12. Радзиевский В.Г., Трифонов П.А. Влияние узкополосной помехи на точность оценки угла прихода сверхширокополосного сигнала // Синтез, передача и прием сигналов управления и связи: межвуз. сб. ст. Воронеж: Госуд. техн. ун-т, 2002. С. 122–127.
13. Радзиевский В.Г., Трифонов П.А. Влияние узкополосной помехи на точность оценки ширины спектра сверхширокополосного сигнала // Радиолокация, навигация, связь: сб. тр. IX Межд. науч.-техн. конф. Воронеж, 2003. Т. 1. С. 132–138.

14. Трифонов А.П., Шинаков Ю.С. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех. М.: Радио и связь, 1986. 246 с.
15. Фалькович С.Е. Оценка параметров сигнала. М.: Сов. радио, 1970. 336 с.
16. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. М.: Радио и связь, 1977. 488 с.

Информация об авторах

Доан Тхе Туан, аспирант кафедры радиофизики Воронежского государственного университета, г. Воронеж, Россия.
Область научных интересов: алгоритмы обработки сверхширокополосных сигналов с неизвестными параметрами.
E-mail: doanhetuan3007@gmail.com

Трифонов Павел Андреевич, доктор технических наук, профессор кафедры радиофизики Воронежского государственного университета, г. Воронеж, Россия.

Область научных интересов: алгоритмы обработки сверхширокополосных сигналов и помех в приложении к системам радиолокации, связи и навигации.

E-mail: bk_123@bk.ru

Physics of Wave Processes and Radio Systems 2025, vol. 28, no. 1, pp. 7–13

DOI 10.18469/1810-3189.2025.28.1.7-13
UDC 621.391
Original Research

Received 25 December 2024
Accepted 27 January 2025
Published 31 March 2025

Method of estimation of frequency parameters of ultra-wideband signals with an unknown spectrum shape in the presence of interference

Tuan T. Doan, Pavel A. Trifonov

Voronezh State University
1, Universitetskaya Square,
Voronezh, 394018, Russia

Abstract – Background. One of the urgent tasks of processing ultra-wideband signals is the assessment of their frequency parameters in complex signal-noise conditions. **Aim.** The paper presents the synthesis and analysis of an algorithm for jointly estimating the central frequency and bandwidth of ultra-wideband signals received against the background of Gaussian narrowband interference and Gaussian white noise. **Methods.** The study uses the computational method of statistical radiophysics and the method of mathematical statistics. **Results.** The characteristic of the joint estimation of the central frequency and frequency band of ultra-wideband signals, including the values of the offsets and scattering of the estimation, is found. It is established that with an increase in the intensity of interference, the accuracy of the joint estimation decreases. **Conclusion.** The obtained results allow us to make a reasonable choice of the necessary algorithm for estimating the frequency parameters of ultra-wideband signals depending on the requirements for the accuracy of estimates in a complex signal-noise environment.

Keywords – gaussian narrowband noise; quasi-likelihood estimate; maximum likelihood; bandwidth; ultra-wideband signal; center frequency.

✉ doanhetuan3007@gmail.com (*Tuan T. Doan*)

 © Tuan T. Doan, Pavel A. Trifonov, 2025

References

1. M. Le et al., “Multivariate signal decomposition for vital signal extraction using UWB impulse radar,” *2023 IEEE Statistical Signal Processing Workshop (SSP)*, pp. 290–294, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/SSP53291.2023.10208009>.
2. Z. Wang, “UWB signal generation and transmission technology,” *2023 3rd International Conference on Electronic Information Engineering and Computer Science (EIECS)*, pp. 989–992, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/EIECS59936.2023.10435495>.
3. A. M. Bobreshov et al., “Generation of ultra-short pulses using the Wilkinson adder,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 24, no. 4, pp. 46–52, 2021, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2021.24.4.46-52>. (In Russ.)
4. D. A. Veden'kin and Yu. E. Sedel'nikov, “Properties and technical applications of antenna arrays focused on a broadband signal,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 26, no. 4, pp. 88–94, 2023, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2023.26.4.88-94>. (In Russ.)
5. A. P. Lyubavskiy and S. N. Razin'kov, “Classification, areas of application and prospects for the development of radio communication systems with ultra-wideband signals,” *Informatika: problemy, metodologiya, tekhnologii: sb. mat. XVIII Mezhd. nauch.-met. konf. Voronezh*, 8–9 February 2018. Voronezh: Nauchno-issledovatel'skie publikatsii, vol. 6, pp. 22–26, 2018, url: <https://www.library.ru/item.asp?id=35580257>. (In Russ.)

6. V. G. Radzievskiy and P. A. Trifonov, *UWB and Interference Processing*. Moscow: Radiotekhnika, 2009. (In Russ.)
7. Yu. E. Korchagin, K. D. Titov, and O. N. Zavalishina, “Quasi-plausible algorithm for estimating the frequency of an ultra-wideband quasi-radio signal with unknown duration,” *Zhurnal radioelektroniki*, no. 8, 2023, doi: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.8.9>. (In Russ.)
8. Yu. Korchagin 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)*, pp. 1–6, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/REEPE53907.2022.9731421>.
9. E. I. Kulikov and A. P. Trifonov, *Estimation of Signal Parameters Against a Background of Interference*. Moscow: Sov. radio, 1978. (In Russ.)
10. P. A. Trifonov and T. T. Doan, “The influence of Gaussian narrowband interference on the accuracy of estimating the average frequency of ultra-wideband signals,” *Teoriya i tekhnika radiosvyazi*, no. 3, pp. 29–34, 2024, url: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=72444873>. (In Russ.)
11. P. A. Trifonov, “The influence of narrowband interference on the threshold characteristics of estimating the parameters of ultra-wideband signals,” *Radiotekhnika*, no. 7, pp. 33–36, 2007. (In Russ.)
12. V. G. Radzievskiy and P. A. Trifonov, “The influence of narrowband interference on the accuracy of estimating the angle of arrival of an ultra-wideband signal,” *Sintez, peredacha i priem signalov upravleniya i svyazi: mezhvuz. sb. st. Voronezh: Gosud. tekhn. un-t*, pp. 122–127, 2002. (In Russ.)
13. V. G. Radzievskiy and P. A. Trifonov, “The influence of narrowband interference on the accuracy of estimating the spectrum width of an ultra-wideband signal,” *Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz': sb. tr. IX Mezhd. nauch.-tekhn. konf. Voronezh*, vol. 1, pp. 132–138, 2003. (In Russ.)
14. A. P. Trifonov and Yu. S. Shinakov, *Joint Discrimination of Signals and Estimation of their Parameters Against a Background of Interference*. Moscow: Radio i svyaz', 1986. (In Russ.)
15. S. E. Fal'kovich, *Estimation of Signal Parameters*. Moscow: Sov. radio, 1970. (In Russ.)
16. V. I. Tikhonov and M. A. Mironov, *Markov Processes*. Moscow: Radio i svyaz', 1977. (In Russ.)

Information about the Authors

Tuan T. Doan, postgraduate student of the Department of Radiophysics, Voronezh State University, Voronezh, Russia.
Research interests: algorithms for processing ultra-broadband signals with unknown parameters.
E-mail: doanthetuan3007@gmail.com

Pavel A. Trifonov, Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Radiophysics, Voronezh State University, Voronezh, Russia.
Research interests: algorithms for processing ultra-broadband signals and interference applied to radar, communications, and navigation systems.
E-mail: bk_123@bk.ru