

РАДИОТЕХНИКА

Radioengineering

XXI век

12 2015**В номере:****РАДИОСИСТЕМЫ****Выпуск 197**

Информационный конфликт
в спектре электромагнитных волн, № 31

Выпуск 197

Статистический синтез радиосистем, № 20



тел./факс: (495) 625-9241
e-mail: info@radiotec.ru
<http://www.radiotec.ru>

ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС 70775 В КАТАЛОГЕ АГЕНТСТВА «РОСПЕЧАТЬ»: ГАЗЕТЫ И ЖУРНАЛЫ

05



РАДИОТЕХНИКА

Включен в перечень ВАК

XXI век

Radioengineering

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Л.П. Андрианова, д.т.н., проф. П.А.Бакулев, д.ф.-м.н., проф. О.В. Бешкий, д.т.н., проф. А.В. Богословский, д.т.н., проф. Р.П. Быстров, д.т.н., проф. В.С. Верба, д.т.н., проф. В.В. Витязев, д.т.н., проф. Э.А. Засовин, д.т.н., доцент А.В. Иванов, д.т.н., проф. В.А. Каплун, д.т.н., проф. Ю.Л. Козирацкий, д.ф.-м.н., проф. А.Г. Козорезов (Великобритания), к.ф.-м.н., с.н.с. В.В. Колесов (зам. главного редактора), д.ф.-м.н., проф. И.Н. Компанец, д.т.н., проф. Г.С. Кондратенков, д.т.н., проф. А.В. Коренной, д.ф.-м.н., проф. Б.Г. Кутуза, д.т.н., проф. В.И. Меркулов, д.т.н., проф. В.И. Мещанов, д.т.н., проф. В.А. Обуховец, д.т.н., проф. А.И. Перов, д.ф.-м.н. В.П. Плесский (Швейцария), д.ф.-м.н., проф. В.В. Проклов, акад. РАН В.И. Пустовойт, д.т.н., проф. В.Г. Радзиевский, д.т.н., проф. Е.М. Сухарев, д.т.н., проф. Е.Ф. Толстов, д.т.н., проф. В.Н. Ушаков, д.т.н., проф. В.Е. Фарбер, акад. РАН И.Б. Фёдоров, д.т.н., проф. Ю.С. Шинаков, д.т.н., проф. С.В. Ягольников, д.т.н., проф. М.С. Ярлыков.

Главный редактор
академик РАН
Ю. В. Гуляев

EDITORIAL BOARD:

L.P. Andrianova, Academician RAS I.B. Fedorov, Academician RAS V.I. Pustovoit, Dr.Sc. (Eng.), Prof. P.A. Bakulev, Dr.Sc. (Phys.-Math.), Prof. O.V. Betskii, Dr.Sc. (Eng.), Prof. A.V. Bogoslovskii, Dr.Sc. (Eng.), Prof. R.P. Bystrov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. V.Ye. Farber, Dr.Sc. (Eng.), Prof. V.A. Kaplun, Dr.Sc. (Phys.-Math.), Prof. I.N. Kompanets, Dr.Sc. (Eng.), Prof. G.S. Kondratenkov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. A.V. Korennoi, Dr.Sc. (Eng.), Prof. Yu.L. Koziratskii, Dr. Sc. (Phys. - Math), Prof. A.G. Kozorezov (Great Britain), Dr.Sc. (Phys.-Math.), Prof. B.G. Kutuza, Dr.Sc. (Eng.), Prof. V.I. Merkulov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. V.P. Meshchanov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. V.A. Obukhovets, Dr.Sc. (Eng.), Prof. V.P. Plessky (Switzerland), Dr.Sc. (Eng.), Prof. A.I. Perov, Dr.Sc. (Phys.-Math.), Prof. V.V. Proklov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. V.G. Radzievskii, Dr.Sc. (Eng.), Prof. Yu.S. Shinakov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. Ye.M. Sukharev, Dr.Sc. (Eng.), Prof. Ye.F. Tolstov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. V.N. Ushakov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. V.S. Verba, Dr.Sc. (Eng.), Dr.Sc. (Eng.), Prof. V.V. Vityazev, Dr.Sc. (Eng.), Prof. S.V. Yagolnikov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. M.S. Yarlykov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. E.A. Zasovin, Dr.Sc. (Eng.), Associate Prof. A.V. Ivanov, Ph.D. (Phys.-Math.), Senior Research Scientist V.V. Kolesov (Deputy Editor).

Editor-in-Chief,
Academician RAS,
Yu.V. Gulyaev

Содержание

№ 12 декабрь 2015 г.

ИНФОРМАЦИОННЫЙ КОНФЛИКТ В СПЕКТРЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

(Журнал в журнале. Главный редактор – засл. деятель науки РФ Ю.Л. Козирацкий)

Козирацкий Юрий Леонтьевич (к 70-летию со дня рождения) 5

Математические модели конфликта и поиска

Результаты оценки влияния шумов естественного происхождения на исход информационного конфликта линии радиосвязи и средства радиоподавления
Владимиров В.И., Владимиров И.В., Шацких В.М. 7

Потенциальная точность оценивания координат источника радиоизлучения в многопозиционных радиосистемах с учетом ошибок определения местоположения приемных пунктов
Кирсанов Э.А., Фомин А.Н. 13

Выбор показателей для оценки эффективности противодействия системам опознавания
Леньшин А.В., Лебелев В.В. 18

Радиоэлектронные информационные средства

Способы синхронизации в забрасываемой пространственно-распределенной системе пеленгования
Козирацкий А.Ю., Паринов М.Л., Петренков С.В. 22

Алгоритм оценки амплитуды отраженного от оптико-электронного средства зондирующего оптического сигнала в турбулентной атмосфере
Прохоров Д.В., Курьянов И.Ю., Плева В.В., Грохотов Е.И. 27

Техбиблиотека
АО «Концерн
«Созвездие»

Функция рассеяния точки при пассивной локации «объект – плоскопараллельный маскирующий экран – приемник» Козирацкий Ю.Л., Донцов А.А., Иванцов А.В., Шмаров А.Н.	31
Оценка эффективности метода поиска авиационного средства по лазерному лучу Нагалин А.В., Кулешов П.Е., Левшин Е.А., Грохотов Е.И.	35
Обработка полей и изображений	
Закономерности поведения системы сопровождения воздушной цели по тепловому портрету в условиях критических интенсивностей Донцов А.А., Козирацкий Ю.Л., Калачев В.В.	43
Пороговые характеристики квазиправдоподобной оценки времени прихода сверхширокополосного сигнала неизвестной формы при воздействии узкополосных помех Трифонов А.П., Беспалова М.Б., Трифонов П.А.	48
Способ повышения разрешения оптических изображений Козирацкий А.Ю., Гревцев А.И., Фролов М.М.	54
Алгоритм адаптивного градиентного выделения контуров объектов на цифровых изображениях, регистрируемых в условиях деструктивных лазерных помех Самойлин Е.А., Пантюхин М.А.	60
Обоснование устройства контроля степени проникновения лазерного луча в многослойный материал на основе пассивной локации Чернухо И.И., Прохоров Д.В., Курьянов И.Ю., Алабовский А.В.	66
Излучение системы накачки лазерных каналов Козирацкий Ю.Л., Прохоров Д.В., Дедов С.В., Грохотов Е.И.	72
Экспериментальные исследования отражательных характеристик элемента поверхности управляемого маскировочного покрытия Некрасов А.А., Иванцов А.В., Омельченко О.Д., Нагалин Д.А., Шмаров А.Н.	76
Технические и алгоритмические решения по созданию адаптивных приемных многолучевых антенных решеток средств радиомониторинга Гриб В.Н., Козлов С.В.	80
Оценка эффективности технических средств обучения специалистов в области радиомониторинга Нагалин А.В., Леншин А.В., Кравцов Е.В., Сеньюков Г.А.	89

СТАТИСТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ РАДИОСИСТЕМ (Журнал в журнале. Главный редактор – д.т.н., проф. А.И. Перов)

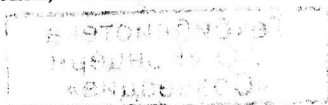
Методы синтеза и алгоритмы оптимальной обработки сигналов в спутниковой навигации	
Характеристики приема сигналов ГНСС в условиях негауссовских помех Ефименко В.С., Харисов В.Н., Ворончихин Д.Н.	95
Анализ алгоритмов обработки сигналов в спутниковой навигации	
Обобщенный геометрический фактор в радионавигационных системах с использованием псевдоспутников Перов А.И., Устинов А.Ю.	101
Цифровой имитатор сигналов GPS Харисов В.Н., Гаврилов А.И., Головин П.М., Медведев П.В., Павлов В.С.	111
Сравнительный анализ алгоритмов слежения за пилотной компонентой сигнала L1OC ГЛОНАСС Перов А.И., Захарова Е.В.	116
Экспериментальное исследование характеристик поиска навигационных радиосигналов с модуляцией ВОС Болденков Е.Н., Липа И.В., Днепров Д.В.	123
Анализ углового дискриминатора в одноэтапном алгоритме определения угловой ориентации по сигналам СРНС Днепров В.В., Корогодин И.В.	129
Анализ эффективности алгоритмов совместного слежения за фазами пилотных компонент сигналов L1OC ГЛОНАСС Перов А.И., Ипполитов С.П.	139

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В РАДИОТЕХНИКЕ

Линейный смаз Богословский А.В., Богословский Е.А., Жигулина И.В., Васильев В.В., Пономарев А.В.	147
--	-----

ОПТОЭЛЕКТРОНИКА И АКУСТОЭЛЕКТРОНИКА

Анализ коэффициента качества коллинеарной анизотропной дифракции света на упругих волнах в кристаллах ниобата лития Голубева А.А., Ушаков Н.М.	155
--	-----



Пороговые характеристики квазиправдоподобной оценки времени прихода сверхширокополосного сигнала неизвестной формы при воздействии узкополосных помех

© Авторы, 2015

© ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2015

А.П. Трифонов – д.т.н., профессор, зав. кафедрой радиофизики, Воронежский государственный университет
E-mail: trifonov@phys.vsu.ru

М.Б. Беспалова – к.ф.-м.н., доцент, кафедра радиофизики, Воронежский государственный университет
E-mail: bmb5@yandex.ru

П.А. Трифонов – д.т.н., доцент, кафедра радиоэлектронной борьбы, ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж)
E-mail: bk_123@bk.ru

Исследованы пороговые характеристики – вероятность надежной оценки (вероятность аномальной ошибки), квазиправдоподобной оценки времени прихода сверхширокополосного сигнала неизвестной формы, принимаемого на фоне узкополосной помехи и гауссовского белого шума.

Ключевые слова: сверхширокополосная оценка, узкополосная помеха, пороговые характеристики оценки, вероятность надежной оценки, вероятность аномальной ошибки.

Threshold characteristics – a reliable estimate of the probability (probability of an abnormal error) quasillikelihood estimate time of arrival ultra-wideband signal with unknown form, accepted against narrow-band interference and gaussian white noise are investigated.

Keywords: ultra-wideband estimates, narrow-band interference, threshold characteristics of estimates, the probability of a reliable estimates, the probability of an abnormal estimates.

В последние годы новым направлением в теории и технике радиотехнических систем является применение сверхширокополосных сигналов (СШПС) [1–4]. Спектр СШПС исключительно широк, поэтому его воздействие вызывает возбуждение практически всех возможных типов собственных колебаний исследуемой цели, что делает высокоинформативной наблюдаемую реакцию. Важной особенностью СШПС является отсутствие у них собственно несущей частоты и, как следствие, невозможность классического описания радиосигналов с помощью комплексной огибающей.

В [5] найдены характеристики надежной квазиправдоподобной оценки времени прихода сверхширокополосного сигнала неизвестной формы при воздействии гауссовского белого шума (ГБШ) и гауссовской узкополосной помехи (ГУП) с неизвестными параметрами. Однако полученные в [5] выражения для характеристик квазиправдоподобной оценки времени прихода могут быть использованы только в условиях высокой апостериорной точности, когда отсутствуют аномальные ошибки и влияние пороговых эффектов пренебрежимо мало [4].

Цель работы – определение таких пороговых характеристик, как вероятность надежной оценки или вероятность аномальной ошибки при не слишком больших отношениях сигнал/шум и больших величинах априорного интервала возможных значений времени прихода.

Пусть на интервале времени $t \in [0; T]$ наблюдается реализация вида

$$x(t) = s_0(t - \lambda_0) + n(t) + \xi(t). \quad (1)$$

Здесь $s_0(t)$ – полезный сигнал, форма которого неизвестна, известно лишь, что он сверхширокополосный; λ_0 – неизвестное время прихода сигнала; $n(t)$ – реализация ГБШ с односторонней спектральной плотностью N_0 ; $\xi(t)$ – узкополосная помеха.

В качестве модели узкополосной помехи используем, как наиболее универсальный [3, 5], узкополосный стационарный гауссовский процесс $\xi(t)$ с нулевым математическим ожиданием $\langle \xi(t) \rangle = 0$ и корреляционной функцией $\langle \xi(t)\xi(t + \Delta) \rangle = B_\xi(\Delta)$. Спектральную плотность ГУП запишем как

$$G_\xi(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} B_\xi(\Delta) \exp(-j\omega\Delta) d\Delta = \frac{\gamma_\xi}{2} \left[g_\xi \left(\frac{\omega_{0\xi} - \omega}{\Omega_\xi} \right) + g_\xi \left(\frac{\omega_{0\xi} + \omega}{\Omega_\xi} \right) \right], \quad (2)$$

где $\Omega_\xi = \int_0^\infty G_\xi^2(\omega) / \max G_\xi^2(\omega) d\omega$ – эквивалентная полоса частот помехи; $\omega_{0\xi}$ – центральная частота.

Поскольку помеха узкополосная, то выполняется условие $\Omega_\xi \ll \omega_{0\xi}$. Функция $g_\xi(x)$ описывает форму спектральной плотности помехи и удовлетворяет условиям $g_\xi(x) \geq 0$, $g_\xi(x) = g_\xi(-x)$.

$\max g_\xi(x) = \int_{-\infty}^\infty g_\xi^2(x) dx = 1$. Полагаем, что процессы $n(t)$ и $\xi(t)$ статистически независимы.

Если бы форма принимаемого сигнала $s_0(t)$ была априори известна, а ГУП отсутствовала, то для оценки времени прихода сигнала λ_0 можно было бы использовать метод максимального правдоподобия [4]. Для этого необходимо взять в качестве оценки положение наибольшего максимума логарифма функционала отношения правдоподобия [4]

$$L_F(\lambda) = \frac{2}{N_0} \int_0^T x(t) s_0(t - \lambda) dt. \quad (3)$$

Если форма сигнала $s_0(t)$ известна неточно, то в (3) в качестве опорного сигнала используем некоторый ожидаемый (предполагаемый) сигнал $s_1(t)$. Таким образом, получаем следующее выражение для выходного сигнала измерителя (решающей статистики):

$$L(\lambda) = \frac{2}{N_0} \int_0^T x(t) s_1(t - \lambda) dt. \quad (4)$$

В качестве оценки $\tilde{\lambda}$ неизвестного времени прихода λ_0 принимается значение λ , при котором решающая статистика (4) достигает абсолютного (наибольшего) максимума. Получаемую оценку будем называть квазиправдоподобной [6]. Действительно, в случае совпадения принимаемого сигнала $s_0(t)$ и ожидаемого сигнала $s_1(t)$ и в отсутствии ГУП, решающая статистика (4) совпадает с логарифмом функционала отношения правдоподобия (3). Соответственно, квазиправдоподобная оценка переходит в оценку максимального правдоподобия.

Для определения характеристик квазиправдоподобной оценки представим решающую статистику (4) в виде суммы сигнальной и шумовой функций [4]

$$L(\lambda) = S_0(\lambda, \lambda_0) + N(\lambda). \quad (5)$$

Здесь $S_0(\lambda, \lambda_0)$ – сигнальная функция:

$$S_0(\lambda, \lambda_0) = \frac{2}{N_0} \int_0^T s_0(t - \lambda_0) s_1(t - \lambda) dt; \quad (6)$$

$N(\lambda)$ – шумовая функция:

$$N(\lambda) = \frac{2}{N_0} \int_0^T s_1(t - \lambda) [n(t) + \xi(t)] dt. \quad (7)$$

Она представляет собой реализацию гауссовского центрированного случайного процесса и обладает корреляционной функцией

$$B_N(\lambda_1, \lambda_2) = \langle N(\lambda_1) N(\lambda_2) \rangle = S_1(\lambda_1, \lambda_2) + B_1(\lambda_1, \lambda_2), \quad (8)$$

где $S_1(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{2}{N_0} \int_0^T s_1(t - \lambda_1) s_1(t - \lambda_2) dt$; $B_1(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{4}{N_0^2} \int_0^T \int_0^T B_\xi(t_2 - t_1) s_1(t - \lambda_1) s_1(t - \lambda_2) dt_1 dt_2$.

Пусть сигнальная функция $S_0(\lambda, \lambda_0)$ (6) при фиксированном λ_0 достигает наибольшего значения в точке $\tilde{\lambda}$ и имеет лишь один ярко выраженный максимум. Тогда отношение сигнал/шум на выходе квазиправдоподобного приемника можно записать как [4]

$$z^2 = S_0^2(\tilde{\lambda}, \lambda_0) / B_N(\tilde{\lambda}, \tilde{\lambda}). \quad (9)$$

Обозначим через Λ – априорный интервал возможных значений времени прихода сверхширокополосного сигнала. Тогда, в соответствии с определением, квазиправдоподобную оценку можно записать в виде

$$\hat{\lambda} = \arg \sup L(\lambda), \lambda \in \Lambda, \quad (10)$$

где $L(\lambda)$ (4) – решающая статистика.

Пусть Δ_{S_i} – длительность сигнальной функции (6), так что

$$S(\lambda_0 \pm \Delta_S, \lambda_0) \cong 0. \quad (11)$$

Выделим на интервале Λ сигнальный интервал

$$\Lambda_S = [\tilde{\lambda} - \Delta_S; \tilde{\lambda} + \Delta_S], \quad (12)$$

в котором сигнальная функция (6) отлична от нуля. Если

$$\tilde{\lambda} \in \Lambda_S, \quad (13)$$

то квазиправдоподобная оценка (10) является надежной [4]. Для случая надежной квазиправдоподобной оценки (10) в [5] найдена ее дисперсия

$$D(\hat{\lambda} | \lambda_0) = \left\{ \frac{N_0}{2} \int_0^T \left[\frac{ds_1(t)}{dt} \right]^2 dt + \int_0^T \int_0^T B_{\xi}(t_2 - t_1) \frac{ds_1(t)}{dt} \frac{ds_2(t)}{dt} dt_1 dt_2 \right\} \times \left[\int_0^T \frac{ds_0(t)}{dt} \frac{ds_1(t - \Delta\lambda)}{dt} dt \right]^{-2}, \quad (14)$$

где $\Delta\lambda = \tilde{\lambda} - \lambda_0$.

Если условие (13) не выполняется, возникает аномальная ошибка и оценка уже не является надежной. Это может привести к резкому (пороговому) ухудшению точности квазиправдоподобной оценки (10). Соответственно, дисперсия квазиправдоподобной оценки становится значительно большей, чем следует из (14). Пороговые свойства квазиправдоподобной оценки можно характеризовать вероятностью надежной оценки [4]

$$P_{01} = P(\tilde{\lambda} \in \Lambda_S). \quad (15)$$

Пусть Λ_N – дополнение подинтервала Λ_S до априорного интервала Λ возможных значений времени прихода, так что $\Lambda = \Lambda_S \cup \Lambda_N$. Обозначим

$$H_S = \sup L(\lambda), \lambda \in \Lambda_S, \quad (16)$$

$$H_N = \sup L(\lambda), \lambda \in \Lambda_N. \quad (17)$$

Поскольку квазиправдоподобная оценка (10) определяется по положению абсолютного максимума решающей статистики (4), выражение (15) можно переписать как

$$P_{01} = P(H_N < H_S). \quad (18)$$

Если априорный интервал Λ возможных значений времени прихода не слишком мал, так что

$$\Lambda_S \ll \Lambda, \quad (19)$$

то случайные величины H_S (16) и H_N (17) приближенно статистически независимы [4]. Это позволяет представить (18) в виде

$$P_{01} = \int F_N(x) dF_S(x), \quad (20)$$

где $F_N(x)$ и $F_S(x)$ – функции распределения случайных величин H_N и H_S соответственно.

Поскольку подинтервал Λ_S (12) приближенно совпадает с интервалом высокой корреляции решающей статистики (4), то при достаточно больших отношениях сигнал/шум (9) согласно (16) можно при-

ближенно считать $H_S = L(\hat{\lambda}) \cong L(\tilde{\lambda})$. Следовательно, при не слишком малых отношениях сигнал/шум (9) случайная величина H_S имеет гауссовское распределение с математическим ожиданием $m_S = S_0(\lambda_0, \tilde{\lambda})$ (6) и дисперсией $\sigma^2 = B_N(\tilde{\lambda}, \tilde{\lambda})$ (8). Соответственно, будем аппроксимировать распределение случайной величины H_S (16) выражением

$$F_S(H) \approx \Phi((H - m_S)/\sigma), \quad (21)$$

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

Когда $\lambda \in \Lambda_N$, то в (5) $S_0(\lambda, \lambda_0) \approx 0$ и, следовательно, (17) можно приближенно переписать как

$$H_N = \operatorname{argsup} N(\lambda), \quad \lambda \in \Lambda. \quad (22)$$

Здесь в силу (19) учтено, что $\Lambda_N \approx \Lambda$. Согласно (8) шумовая функция $N(\lambda)$ (7) представляет собой гауссовский стационарный случайный процесс. Следовательно, $F_N(H)$ является функцией распределения величины наибольшего максимума гауссовского стационарного случайного процесса на априорном интервале Λ . Приближенное выражение для этого распределения приводится в [4, 7] и имеет вид

$$F_N(H) \approx \exp\left[-\frac{\xi}{2\pi} \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma^2}\right)\right], \quad (23)$$

где ξ – приведенная длина априорного интервала Λ возможных значений времени прихода СШПС, которая определяет число некоррелированных значений случайного процесса $N(\lambda)$ (7) на интервале Λ :

$$\xi = \frac{\Lambda}{\sigma} \left[\frac{\partial^2 B_N(\lambda_1, \lambda_2)}{\partial \lambda_1 \partial \lambda_2} \right]_{\lambda_1 = \lambda_2}^{1/2}. \quad (24)$$

Подставим (8) в (24) и выполним дифференцирование. Получим для приведенной длины выражение

$$\xi = \Lambda \frac{\left[\frac{N_0}{2} \int_0^T \left[\frac{ds_1(t)}{dt} \right]^2 dt + \int_0^T \int_0^T B_\xi(t_2 - t_1) \frac{ds_1(t_1)}{dt_1} \frac{ds_1(t_2)}{dt_2} dt_1 dt_2 \right]^{1/2}}{\left[\frac{N_0}{\xi} \int_0^T s_1^2(t) dt + \int_0^T \int_0^T B_\xi(t_2 - t_1) s_1(t_1) s_1(t_2) dt_1 dt_2 \right]^{1/2}}. \quad (25)$$

Подставляя далее (21) и (23) в (20), находим приближенное выражение для вероятности надежной оценки времени прихода СШПС неизвестной формы:

$$P_{01} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{(x-z)^2}{2} - \frac{\xi}{2\pi} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right)\right] dx. \quad (26)$$

Здесь z определяется выражением (9). Соответственно, для вероятности аномальной ошибки можем записать [4]

$$P_{a1} = 1 - P_{01} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{\xi}{2\pi} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right)\right] \right\} \exp\left[-\frac{(x-z)^2}{2}\right] dx. \quad (27)$$

Точность приближенных формул (26) и (27) улучшается с ростом ξ и z [4, 7]. Формула (26) для вероятности надежной оценки и формула (27) для вероятности аномальной ошибки довольно громоздки и расчет по ним возможен только численными методами. Поэтому найдем простую верхнюю границу для вероятности аномальной ошибки (27). Воспользовавшись неравенством $1 - \exp(-x) \leq x$ при $x > 0$, из (27) имеем аналогично [4, 7]

$$P_{a1} \leq P_{a1}^* = \frac{\xi}{2\pi\sqrt{2}} \exp\left(-\frac{z^2}{4}\right). \quad (28)$$

В частном случае, когда формы принимаемого и ожидаемого сигналов совпадают ($s_0(t) = s_1(t)$) и ГУП отсутствует $B_\xi(\Delta) = 0$, выражения (26)–(28) переходят в аналогичные выражения для вероятностей надежной оценки и аномальной ошибки оценки максимального правдоподобия СШПС известной формы на фоне ГБШ [4, 7]. В частности, верхняя граница для вероятности аномальной ошибки оценки максимального правдоподобия запишется как

$$P_a^* = \frac{\xi_0}{2\pi\sqrt{2}} \exp\left(-\frac{z_0^2}{4}\right), \quad (29)$$

где $z_0^2 = 2 \int_0^T s_0^2(t) dt / N_0$ – отношение сигнал/шум; ξ_0 – приведенная длина априорного интервала возможных значений времени прихода СШПС известной формы при наличии только ГБШ:

$$\xi_0 = \Lambda \left[\int_0^T \left[\frac{ds_0(t)}{dt} \right]^2 dt / \int_0^T s_0^2(t) dt \right]^{1/2}. \quad (30)$$

Сравним вероятности аномальной ошибки квазиравдоподобной оценки и оценки максимального правдоподобия. Сопоставляя (28) и (29), получаем

$$\alpha = \frac{P_{a1}^*}{P_a^*} = \kappa \exp\left[\frac{z_0^2(1-\chi)}{4}\right], \quad (31)$$

где χ – величина, которая характеризует уменьшение отношения сигнал/шум:

$$\chi = \frac{z^2}{z_0^2} = \frac{\left[\int_0^T s_0(t) s_1(t - \Delta\lambda) dt \right]^2}{\int_0^T s_0^2(t) dt \left[\int_0^T s_1^2(t) dt + \frac{2}{N_0} \int_0^T \int_0^T B_\xi(t_2 - t_1) s_1(t_1) s_1(t_2) dt_1 dt_2 \right]} \leq 1; \quad (32)$$

κ – величина, которая характеризует изменение приведенной длины априорного интервала Λ :

$$\kappa = \frac{\int_0^T s_0^2(t) dt \left[\int_0^T \left[\frac{ds_1(t)}{dt} \right]^2 dt + \frac{2}{N_0} \int_0^T \int_0^T B_\xi(t_2 - t_1) \frac{ds_1(t_1)}{dt_1} \frac{ds_1(t_2)}{dt_2} dt_1 dt_2 \right]}{\left[\int_0^T \left[\frac{ds_0(t)}{dt} \right]^2 dt \right] \left[\int_0^T s_1^2(t) dt + \frac{2}{N_0} \int_0^T \int_0^T B_\xi(t_2 - t_1) s_1(t_1) s_1(t_2) dt_1 dt_2 \right]}. \quad (33)$$

Величина (31) показывает, во сколько раз возрастает вероятность аномальной ошибки вследствие априорного незнания формы СШПС и воздействия ГУП. Согласно (31) относительный проигрыш в надежности оценки возрастает с увеличением отношения сигнал/шум.

Выражения (32), (33) заметно упрощаются, если отсутствует ГУП, т.е. $B_\xi(\Delta) = 0$. Тогда имеем из (32) $\chi = R_s^2(\Delta\lambda)$, где $R_s(\Delta\lambda)$ – коэффициент взаимной корреляции между принимаемым СШПС и ожидаемым сигналом, задержанным на величину систематической ошибки $\Delta\lambda$ квазиравдоподобной оценки:

$$R_s(\Delta\lambda) = \int_0^T s_0(t) s_1(t - \Delta\lambda) dt / \sqrt{\int_0^T s_0^2(t) dt \int_0^T s_1^2(t) dt}.$$

Соответственно выражение (33) принимает вид

$$\kappa = \left\{ \int_0^T s_0^2(t) dt \int_0^T \left[\frac{ds_1(t)}{dt} \right]^2 dt / \int_0^T s_1^2(t) dt \int_0^T \left[\frac{ds_0(t)}{dt} \right]^2 dt \right\}^{1/2}$$

- Найденные пороговые характеристики квазиравдоподобной оценки позволяют делать обоснованный выбор формы и параметров ожидаемого сигнала в зависимости от имеющейся априорной информации и допустимого проигрыша в надежности оценки времени прихода СШПС:

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты №13-01-97504 и №13-08-00735).

Литература

1. Астанин Л.Ю., Костылев А.А. Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений. М.: Радио и связь. 1989. 192 с.
2. James D. Taylor Introduction to Ultra-wideband Radar Systems. CRC press Boca Raton, Ann Arbor, London, Tokyo, New-York. 1995. 486 p.
3. Радзиевский В.Г., Трифонов П.А. Обработка сверхширокополосных сигналов и помех. М.: Радиотехника. 2009. 288 с.
4. Куликов Е.И., Трифонов А.П. Оценка параметров сигналов на фоне помех. М.: Сов. радио. 1978. 296 с.
5. Трифонов А.П., Беспалова М.Б., Трифонов П.А., Гушин И.В. Квазиравдоподобная оценка времени прихода сверхширокополосного сигнала неизвестной формы при воздействии узкополосной помехи // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. 2014. Т. 57. № 10. С. 34–41.
6. Мудров В.И., Кушко В.Л. Методы обработки измерений. Квазиравдоподобные оценки. М.: Радио и связь. 1983. 304 с.
7. Трифонов А.П., Шинаков Ю.С. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех. М.: Радио и связь. 1986. 264 с.

Поступила 7 июля 2015 г.

Threshold characteristics of the quasilielihood estimate time of arrival ultra-wideband signal unknown form under the influence of a narrow-band interference

© Authors, 2015

© Radiotekhnika, 2015

A.P. Trifonov – Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of Department of Radiophysics, Voronezh State University

E-mail: trifonov@phys.vsu.ru

M.B. Bepalova – Ph. D. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Radiophysics, Voronezh State University

E-mail: bmb5@yandex.ru

P.A. Trifonov – Dr. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of Electronic Warfare,

MESC «Zhukovsky-Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)

E-mail: bk_123@bk.ru

In recent years, a new trend in the theory and technology of electronic system is the use of ultra-wideband signals (UWBS). Early was found characteristics quasilielihood reliable estimates arrival time UWBS unknown form under the influence of narrow-band interference. However, these results can be used only in absence of abnormal errors.

In this paper we determine the probability of abnormal error and threshold characteristics quasilielihood assessment, which allow making an informed choice of the form and parameters of the expected signal, depending on the available a priori information and the allowable loss in reliability assessment UWBS arrival time.

References

1. Astanin L. Yu., Kostylev A. A. Osnovy' sverxshirokopolosny'x radiolokacionny'x izmerenij. M.: Radio i svyaz'. 1989. 192 s.
2. James D. Taylor Introduction to Ultra-wideband Radar Systems. CRC press Boca Raton, Ann Arbor, London, Tokyo, New-York. 1995. 486 p.
3. Radzievskij V. G., Trifonov P. A. Obrabotka sverxshirokopolosny'x signalov i pomex. M.: Radiotekhnika. 2009. 288 s.
4. Kulikov E. I., Trifonov A. P. Ocenka parametrov signalov na fone pomex. M.: Sov. radio. 1978. 296 s.
5. Trifonov A. P. Kvizipravdopodobnaya ocenka vremeni prixoda sverxshirokopolosnogo signala neizvestnoj formy' pri vozdeystvii uzkopolosnoj pomexi // Trifonov A. P., Bepalova M. B., Trifonov P. A., Gushhin I. V. // Izvestiya VUZov. Radioelektronika. 2014. T. 57. № 10. S. 34–41.
6. Mudrov V. I., Kushko V. L. Metody' obrabotki izmerenij. Kvizipravdopodobny'e ocenki. M.: Radio i svyaz'. 1983. 304 s.
7. Trifonov A. P., Shinakov Yu. S. Sovmestnoe razlichenie signalov i ocenka ix parametrov na fone pomex. M.: Radio i svyaz'. 1986. 264 s.