



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. Бецкий, д.т.н., проф. А.В. Богословский, д.т.н., проф. А.Л. Бузов, д.т.н., проф. С.А. Букашкин, д.т.н., проф. Р.П. Быстров, чл.-корр. РАН 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. 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.П. Мешанов, 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. В.А. Цимбал, д.т.н., проф. Ю.С. Шинаков, в.н.с. Энрико Верона (Италия), 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. Pustovoi, Dr.Sc. (Eng.), Corresponding Member RAS V.S. Verba, Prof. P.A. Bakulev, Dr.Sc. (Phys.-Math.), Prof. O.V. Betskii, Dr.Sc. (Eng.), Prof. A.V. Bogoslovskii, Dr.Sc. (Eng.), Prof. A.L. Buzov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. S.A. Bukashkin, Dr.Sc. (Eng.), Prof. R.P. Bystrov, Dr.Sc. (Eng.), Prof. V.Ye. Farber, 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.A. Tsimbal, Dr.Sc. (Eng.), Prof. V.N. Ushakov, Dr.Sc. (Eng.), 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, associate researcher Enrico Verona (Italy), Ph.D. (Phys.-Math.), Senior Research Scientist V.V. Kolesov (Deputy Editor).

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

Содержание

№ 3 март 2018 г.

Радиосистемы: СИНТЕЗ И АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ И УСТРОЙСТВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

(Журнал в журнале. Главный редактор – д.т.н., проф. В.Г. Карташевский)

Синтез и анализ систем и устройств обработки сигналов

- | | |
|--|----|
| Оценка длительности регулярного радиосигнала с частично неизвестными амплитудой и начальной фазой
Корчагин Ю.Э., Овчинникова Н.С. | 5 |
| Оценка величины спектральной плотности случайного сигнала с неизвестной шириной полосы частот
Корчагин Ю.Э., Турбин М.М. | 12 |
| Синтез адаптивных блоков нелинейного преобразования следящих измерителей с учетом конечного отношения сигнал/помеха на входе
Артюшенко В.М., Воловач В.И. | 19 |
| Алгоритмы адаптивной нелинейной обработки сигналов блоков нелинейного преобразования с квадратурными генераторами
Артюшенко В.М., Воловач В.И. | 32 |

Синтез и статистический анализ дискриминаторов следящих измерителей при воздействии аддитивных коррелированных негауссовских помех Артюшенко В.М., Воловач В.И.	34
Распределение ошибок синхронизации сверхширокополосных сигналов в измерителях типа дискриминатор-ограничитель Радченко Ю.С.	43
Повышение энергетической эффективности передачи сигналов в нелинейном радиотракте Паршин Ю.Н.	48
Общие вопросы анализа алгоритмов и систем обработки сигналов	
Оценка эффективности компенсации нелинейных искажений сигналов OFDM в нелинейных инерционных устройствах Тихонов В.Ю., Шинаков Ю.С.	54
Электродинамический анализ тонкопроволочных излучающих структур с поворотной симметрией Табakov Д.П., Морозов С.В., Куприянов Д.А.	60
Алгоритмы функционирования устройств обработки сигналов	
Система OFDM для канала с памятью и быстрыми замираниями Карташевский В.Г., Семенов Е.С., Слипенчук К.С., Филимонов А.А.	65
Схемотехника и элементная база устройств обработки сигналов	
Измерение акустической скорости акустооптического кристалла в широкополосных преобразователях частоты Бобрешов А.М., Коровченко И.С., Олейников А.В.	70
Генератор сверхкоротких импульсов с длительным накоплением и обострителем на основе диода с накоплением заряда Бобрешов А.М., Жабин А.С., Рязанцев А.Д., Степкин В.А., Усков Г.К.	75
Современные методы повышения быстродействия операционных усилителей для систем на кристалле Бугакова А.В., Денисенко Д.Ю., Овсепян Е.В., Прокопенко Н.Н.	80
Функционирование устройств обработки сигналов: прикладные вопросы	
Обработка сигнала в распределенных оптоволоконных датчиках температуры на комбинационном рассеянии света: обзор новых результатов Стукач О.В., Сычѐв И.В.	86
<hr/>	
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В РАДИОТЕХНИКЕ	
Оценивание координат состояния в многодиапазонных РЛС Меркулов В.И., Садовский П.А.	93
<hr/>	
АЛГОРИТМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ: ПЕРЕДАЧА, ПРИЕМ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ	
Алгоритм распознавания типа воздушной цели с турбореактивным двигателем на основе модуляционных признаков Надточий В.Н., Аврамов А.В., Антипов В.Н., Янковский В.Т.	101
<hr/>	
АНТЕННЫ, РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН И ТЕХНИКА СВЧ	
Активно-пассивный сканирующий радиометр на коротких миллиметровых волнах для формирования радиоизображений и определения излучающих и отражающих свойств окружающей среды Потапов А.А., Ракуть И.В.	107
<hr/>	
МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ В РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ	
Сессионная модель управления миниатюрными специализированными технологическими комплексами Найдѐнов Е.В.	114
Перечень книг, выпускаемых Издательством «Радиотехника»	125

Синтез и анализ алгоритмов и устройств обработки сигналов

№ 6

Главный редактор – д.т.н., проф. **В.Г. Карташевский**

Редакционная коллегия: д.т.н., проф. **В.М. Артюшенко**, д.т.н., доц. **В.И. Воловач** (редактор выпуска),
д.т.н., проф. **Ю.С. Шинаков** (зам. главного редактора)

Синтез и анализ систем и устройств обработки сигналов

УДК 621.321

Оценка длительности регулярного радиосигнала с частично неизвестными амплитудой и начальной фазой

© Авторы, 2018

© ООО «Издательство «Радиотехника», 2018

Ю.Э. Корчагин – д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой радиофизики, Воронежский государственный университет
E-mail: korchagin@phys.vsu.ru

Н.С. Овчинникова – магистрант, кафедра радиофизики, Воронежский государственный университет
E-mail: dyshetzka@mail.ru

Синтезированы квазиправдоподобный и максимально правдоподобный алгоритмы оценки длительности регулярного радиосигнала с частично неизвестными амплитудой и начальной фазой в предположении, что решающая статистика дважды дифференцируема по неизвестным параметрам. Определены характеристики синтезированных алгоритмов. Найдены величины расстройек амплитуды и начальной фазы, при которых квазиправдоподобный алгоритм оценки длительности обладает более высокой точностью, чем максимально правдоподобный.

Ключевые слова: длительность, амплитуда, начальная фаза, оценка, смещение, дисперсия, рассеяние.

Quasilielihood and maximum likelihood algorithms for estimating the regular radiosignal duration with a partially unknown amplitude and initial phase. It was assumed that the decisive statistics twice differentiable in the unknown parameters. Characteristics of the synthesized algorithms are found. The found values of the detuning amplitude and initial phase in which quasilielihood algorithm for estimating the duration has higher accuracy than maximum likelihood.

Keywords: duration, amplitude, initial phase, estimation, bias, variance.

Задача приема радиосигнала с неизвестной длительностью, наблюдаемого на фоне шума, актуальна в практических приложениях теории связи, локации, навигации и не раз обсуждалась в литературе [1–7]. Так, ранее была рассмотрена оценка длительности регулярного радиосигнала с известной амплитудой и начальной фазой [4], оценка длительности регулярного радиосигнала с неизвестными амплитудой и начальной фазой [4], оценка длительности разрывного радиосигнала с неизвестными амплитудой и начальной фазой [8, 9]. Однако возможна ситуация, когда амплитуда и начальная фаза радиосигнала известна лишь частично, то есть истинные значения амплитуды и начальной фазы точно неизвестны, но известны некоторые ограниченные интервалы, которым принадлежат эти значения. Таким образом, частично неизвестная величина – это величина (амплитуда или начальная фаза), известная только с точностью до некоторого априорного интервала. Ранее была рассмотрена оценка длительности регулярного сигнала с частично неизвестной амплитудой [10].

Ц е л ь д а н н о й р а б о т ы – рассмотреть алгоритмы оценки длительности регулярного радиосигнала с частично неизвестными амплитудой и начальной фазой.

Пусть в течение интервала времени $t \in [0, T]$ наблюдается реализация $\xi(t)$ аддитивной смеси сигнала и шума:

$$\xi(t) = s(t, a_0, \varphi_0, \tau_0) + n(t),$$

где $s(t, a_0, \varphi_0, \tau_0)$ – полезный узкополосный радиосигнал:

$$s(t, a_0, \varphi_0, \tau_0) = a_0 f(t / \tau_0) \cos(\omega_0 t - \varphi_0); \quad (1)$$

$n(t)$ – гауссовский белый шум с односторонней спектральной плотностью N_0 ; a_0, φ_0, τ_0 – истинные значения соответственно амплитуды, начальной фазы и эквивалентной длительности радиосигнала $s(t, a_0, \varphi_0, \tau_0)$.

Функция $f(x)$ описывает форму огибающей принимаемого сигнала и нормирована так, что

$$\int_{-\infty}^{\infty} f^2(x) dx = \max f(x) = 1.$$

Необходимо, располагая наблюдаемой реализацией $\xi(t)$, сформировать оценку эквивалентной длительности.

Для синтеза алгоритма оценки воспользуемся методом максимального правдоподобия (МП) [1, 2, 4], согласно которому оценка длительности совпадает с положением абсолютного (наибольшего) максимума логарифма функционала отношения правдоподобия (ФОР). Однако при неизвестных длительности, амплитуде и начальной фазе радиосигнала $s(t, a, \varphi, \tau)$ логарифм ФОР зависит от трех неизвестных параметров [1, 2, 4]:

$$L(a, \varphi, \tau) = \frac{2}{N_0} \int_0^T \xi(t) s(t, a, \varphi, \tau) dt - \frac{1}{N_0} \int_0^T s^2(t, a, \varphi, \tau) dt. \quad (2)$$

Следовательно, имеется априорная параметрическая неопределенность относительно амплитуды и начальной фазы. Первым способом преодоления этой неопределенности является применение квазиравдоподобного (КП) алгоритма оценки, согласно которому вместо неизвестных амплитуды и начальной фазы в выражении (2) используются их некоторые ожидаемые (прогнозируемые) значения \tilde{a} и $\tilde{\varphi}$. Тогда вместо логарифма ФОР необходимо формировать решающую статистику как функцию оцениваемого параметра τ :

$$\tilde{L}(\tau) = L(\tilde{a}, \tilde{\varphi}, \tau) = \frac{2}{N_0} \int_0^T \xi(t) s(t, \tilde{a}, \tilde{\varphi}, \tau) dt - \frac{1}{N_0} \int_0^T s^2(t, \tilde{a}, \tilde{\varphi}, \tau) dt. \quad (3)$$

Квазиравдоподобная оценка (КПО) длительности определяется положением максимума решающей статистики (3):

$$\hat{\tau} = \operatorname{argsup} \tilde{L}(\tau). \quad (4)$$

Поскольку амплитуда \tilde{a} и начальная фаза $\tilde{\varphi}$ опорного сигнала $s(t, \tilde{a}, \tilde{\varphi}, \tau)$ в (3) в общем случае не совпадают с истинными значениями a_0 и φ_0 , будем называть оценку (4) квазикогерентной.

Выполним анализ КП алгоритма оценки длительности. Для этого представим решающую статистику (3) в виде суммы сигнальной и шумовой составляющих:

$$\tilde{L}(\tau) = S(\tau) + N(\tau).$$

Сигнальную и шумовую составляющие запишем в следующем виде:

$$S(\tau) = z_0^2 (1 + \delta a) \cos(\Delta \varphi) S_0(\tau, \tau_0) - \frac{z_0^2 (1 + \delta a)^2}{2\tau_0} Q(\tau),$$

$$N(\tau) = \frac{2a_0(1 + \delta a)}{N_0} \int_0^T f(t/\tau) \cos[\omega_0 t - (\varphi_0 + \Delta \varphi)] n(t) dt,$$

где

$$S_0(\tau, \tau_0) = \frac{1}{\tau_0} \int_0^T f(t/\tau_0) f(t/\tau) dt, \quad Q(\tau) = \int_0^T f^2(t/\tau) dt, \quad \delta a = \frac{\tilde{a} - a_0}{a_0}, \quad \Delta \varphi = \tilde{\varphi} - \varphi_0 \quad (5), (6), (7), (8)$$

– величины, характеризующие расстройки ожидаемых значений амплитуды и начальной фазы узкополосного ра-

диосигнала относительно их истинных значений;

$$z_0^2 = a_0^2 \tau_0 / N_0 \quad (9)$$

– отношение сигнал/шум (ОСШ) на выходе приемника МП для радиосигнала с амплитудой a_0 , начальной фазой φ_0 и длительностью τ_0 .

Учитывая, что время наблюдения много больше длительности радиосигнала ($T \gg \tau$), устремим пределы интегрирования в (5) к бесконечности:

$$S_0(\tau, \tau_0) = \frac{\tau}{\tau_0} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) f\left(\frac{\tau}{\tau_0} x\right) dx.$$

Введем нормированные формулы для логарифма ФОП, сигнальной и шумовой составляющих: $\tilde{L}_n(\tau) = \tilde{L}(\tau)/z_0^2$, $\tilde{S}(\tau) = S(\tau)/z_0^2$, $\tilde{N}(\tau) = N(\tau)/z_0$. При этом $\tilde{N}(\tau)$ представляет собой гауссовский СП с нулевым математическим ожиданием и корреляционной функцией $\tilde{K}(\tau_1, \tau_2) = (1 + \delta a)^2 S_0(\tau_1, \tau_2)$. Тогда для нормированного логарифма ФОП можем записать

$$\tilde{L}_n(\tau) = \tilde{S}(\tau) + \tilde{N}(\tau)/z_0. \quad (10)$$

Оценка длительности (4) радиосигнала может быть найдена как решение уравнения правдоподобия [4]

$$\left[d\tilde{L}_n(\tau)/d\tau \right]_{\hat{\tau}} = 0 \quad (11)$$

при условии $\left[d^2\tilde{L}_n(\tau)/d\tau^2 \right]_{\hat{\tau}} < 0$.

Определим характеристики оценки (4) при больших ОСШ ($z_0 \gg 1$). Согласно (10) с ростом ОСШ оценка (4) сходится в среднеквадратическом к положению максимума сигнальной составляющей $\tilde{S}(\tau)$ [4] $\tilde{\tau} = \arg \sup \tilde{S}(\tau)$. Найдем приближенное решение уравнения (11), Для этого используем метод малого параметра [4], в качестве которого выберем величину ε , обратную ОСШ: $\varepsilon = 1/z_0$.

Ограничимся рассмотрением случая $|\delta a| < 1$ [4]. Разлагая левую часть уравнения (11) в ряд Тейлора по τ в окрестности $\tilde{\tau}$ и учитывая лишь первое приближение, методом малого параметра получим условные значения смещения $\tilde{b}(\hat{\tau})$, дисперсии $\tilde{D}(\hat{\tau})$ и рассеяния $\tilde{V}(\hat{\tau})$ квазикогерентной КПО (4) длительности радиосигнала [4]:

$$\tilde{b}(\hat{\tau}) = \langle \hat{\tau} - \tau_0 \rangle = \tau_0 \delta \tau, \quad (12)$$

$$\tilde{D}(\hat{\tau}) = \langle (\hat{\tau} - \langle \hat{\tau} \rangle)^2 \rangle = \frac{\tau_0^2 (1 + \delta \tau)}{z_0^2 \cos^2 \Delta \varphi \alpha^2} \int_{-\infty}^{\infty} \left(x \frac{df(x)}{dx} \right)^2 dx, \quad (13)$$

$$\tilde{V}(\hat{\tau}) = \tilde{V} = \langle (\hat{\tau} - \tau_0)^2 \rangle = \tilde{b}^2 + \tilde{D}, \quad (14)$$

где $\delta \tau = \frac{\tilde{\tau} - \tau_0}{\tau_0}$; $\alpha = 2 \int_{-\infty}^{\infty} x \frac{df(x)}{dx} f[(1 + \delta \tau)x] dx + \int_{-\infty}^{\infty} x^2 \frac{d^2 f(x)}{dx^2} f[(1 + \delta \tau)x] dx$.

Если амплитуда и начальная фаза принимаемого радиосигнала априори известны ($\tilde{a} = a_0$, $\tilde{\varphi} = \varphi_0$, $\delta a = 0$, $\Delta \varphi = 0$), то квазикогерентная КПО длительности регулярного радиосигнала совпадает с оценкой максимального правдоподобия (ОМП) длительности сигнала с априори известными амплитудой и начальной фазой [4]. В данном случае ОМП длительности является условно несмещенной и значения условных дисперсии и рассеяния совпадают и имеют вид

$$D_m = V_m = \frac{\tau_0^2}{z_0^2} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \left(x \frac{df(x)}{dx} \right)^2 dx \right]^{-1}. \quad (15)$$

В качестве примера, иллюстрирующего полученные результаты, рассмотрим оценку длительности колокольного радиоимпульса, форма огибающей которого описывается функцией

$$f(x) = \exp[-\pi x^2/2]. \quad (16)$$

Подставим функцию (16) в формулы (12)–(14), получим выражения для условных значений смещения, дисперсии и рассеяния:

$$\begin{aligned} \tilde{b} &= \tau_0 \left(\frac{\sqrt{2(\cos \Delta\varphi)^{2/3} - (1 + \delta a)^{2/3}}}{(1 + \delta a)^{1/3}} - 1 \right), \quad \tilde{D} = D_m = \frac{\tau_0^2}{24z_0^2} \frac{[1 + (1 + \delta\tau)^2]^5}{(1 + \delta\tau)^3 \cos^2 \Delta\varphi}, \\ \tilde{V} &= \tau_0^2 \left(\frac{\sqrt{2(\cos \Delta\varphi)^{2/3} - (1 + \delta a)^{2/3}}}{(1 + \delta a)^{1/3}} - 1 \right)^2 + \frac{\tau_0^2}{24z_0^2} \frac{[1 + (1 + \delta\tau)^2]^5}{(1 + \delta\tau)^3 \cos^2 \Delta\varphi}. \end{aligned} \quad (17)$$

В частном случае, когда $\delta a = 0$ и $\Delta\varphi = 0$, квазикогерентная КПО переходит в ОМП с характеристиками (15) $b_m = 0$, $D_m = V_m = 4\tau_0^2 / (3z_0^2)$.

Для сравнения точности квазикогерентной КПО длительности (4) с точностью ОМП при известных амплитуде и начальной фазе, введем в рассмотрение величину проигрыша

$$\chi = \frac{\tilde{V}}{V_m} = \frac{1}{32} \left[24z_0^2 (1 + \delta\tau)^3 \delta\tau^2 \cos^2 \Delta\varphi + \frac{[1 + (1 + \delta\tau)^2]^5}{(1 + \delta\tau)^3 \cos^2 \Delta\varphi} \right]. \quad (18)$$

Проигрыш показывает, во сколько раз рассеяние КПО (4) больше рассеяния ОМП длительности радиосигнала с известными амплитудой и начальной фазой, характеризуя таким образом влияние априорного незнания амплитуды и начальной фазы на точность оценки длительности.

На рис. 1 представлены графики зависимости относительного смещения $\tilde{b}/\tau_0 = \delta\tau$ (а) и проигрыша (18) от относительной расстройки амплитуды δa (б) и от расстройки начальной фазы $\Delta\varphi$ (в). Как видно из рис. 1, точность квазикогерентной КПО длительности ухудшается с увеличением значений относительной расстройки амплитуды (7) и расстройки начальной фазы (8) в несколько раз. Следовательно, квазикогерентный КП алгоритм оценки длительности имеет лучшую эффективность в случае малых расстроек амплитуды и начальной фазы или при больших значениях ОСШ, а априорное незнание амплитуды и начальной фазы может привести к существенному снижению точности оценки длительности.

С целью улучшения точности оценки длительности радиосигнала можно применить МП-алгоритм, основанный на поиске абсолютного максимума логарифма ФОП:

$$\tau_m = \arg \sup_{\tau} L_{a\varphi}(\tau), \quad (19)$$

$$\text{где } L_{a\varphi}(\tau) = L(a_m, \varphi_m, \tau) = \sup_{a, \varphi} L(a, \varphi, \tau).$$

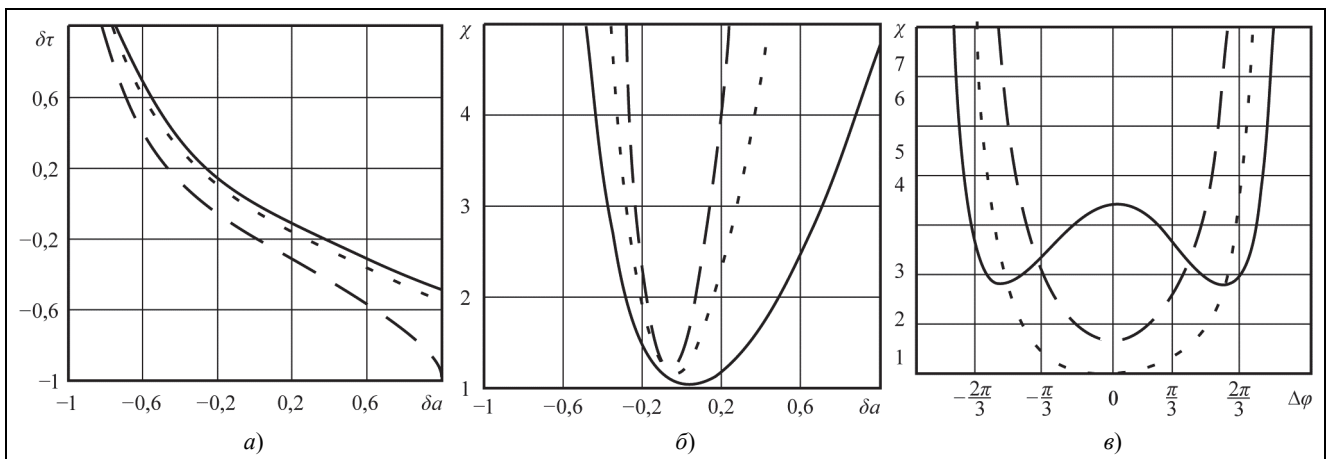


Рис. 1. Графики зависимости относительного смещения от относительной расстройки амплитуды δa для $\Delta\varphi = 0$ (сплошная линия), $\pi/8$ (пунктирная линия) и $\pi/4$ (штриховая линия) (а) и графики проигрыша квазикогерентной КПО длительности от относительной расстройки амплитуды δa для $\Delta\varphi = \pi/8$ и $z_0 = 4$ (сплошная линия), 8 (пунктирная линия) и 12 (штриховая линия) (б) и от расстройки начальной фазы $\Delta\varphi$ для $z_0 = 5$ и $\delta a = -0,4$ (сплошная линия), 0 (пунктирная линия) и 0,4 (штриховая линия) (в)

Выполнив максимизацию логарифма ФОП (2) по a и φ аналогично [9], получим

$$L_{a\varphi}(\tau) = \frac{N_0}{Q(\tau)} [X_1^2(\tau) + Y_1^2(\tau)], \quad (20)$$

$$\text{где } X_1(\tau) = \frac{2}{N_0} \int_0^T \xi(t) f(t/\tau) \cos(\omega_0 t) dt, \quad Y_1(\tau) = \frac{2}{N_0} \int_0^T \xi(t) f(t/\tau) \sin(\omega_0 t) dt.$$

Подставив в последние выражения реализацию $\xi(t)$, перепишем решающую статистику (20) в виде $L_{a\varphi}(\tau) = S_{a\varphi}(\tau) + N_1(\tau) + N_2(\tau)$, где

$$S_{a\varphi}(\tau) = \frac{z_0^2}{2Q(\tau)} S_0^2(\tau, \tau_0) \quad (21)$$

(функции $S_0(\tau, \tau_0)$ и $Q(\tau)$ определены формулами (5) и (6) соответственно);

$$N_1(\tau) = \frac{\tau_0}{Q(\tau)} S_0(\tau, \tau_0) [N_c(\tau) \cos \varphi_0 + N_s(\tau) \sin \varphi_0] \quad \text{и} \quad N_2(\tau) = \frac{N_0}{2a_0^2 Q(\tau)} [N_c^2(\tau) + N_s^2(\tau)]$$

– шумовые составляющие логарифма ФОП;

$$N_c(\tau) = \frac{2a_0}{N_0} \int_0^T f(t/\tau) n(t) \cos(\omega_0 t) dt; \quad N_s(\tau) = \frac{2a_0}{N_0} \int_0^T f(t/\tau) n(t) \sin(\omega_0 t) dt.$$

Дисперсии случайных процессов $N_1(\tau)$ и $N_2(\tau)$ пропорциональны z_0^2 и z_0^0 соответственно. Введем нормированные логарифм ФОП, сигнальную и шумовые составляющие: $L_{na\varphi}(\tau) = L_{a\varphi}(\tau)/z_0^2$, $S_{na\varphi}(\tau) = S_{a\varphi}(\tau)/z_0^2$, $N_{n1}(\tau) = N_1(\tau)/z_0$, $N_{n2}(\tau) = N_2(\tau)$. Тогда нормированный логарифм ФОП запишем как

$$L_{na\varphi}(\tau) = S_{na\varphi}(\tau) + \varepsilon N_{n1}(\tau) + \varepsilon^2 N_{n2}(\tau), \quad (22)$$

где $\varepsilon = 1/z_0$.

При больших ОСШ (9) ($z_0 \gg 1$) последним слагаемым в выражении (22) можно пренебречь, а нормированный логарифм ФОП переписать в виде

$$L_{na\varphi}(\tau) = S_{na\varphi}(\tau) + \varepsilon N_{n1}(\tau), \quad (23)$$

где $N_{n1}(\tau)$ – гауссовский случайный процесс с нулевым математическим ожиданием и корреляционной функцией

$$K_{na\varphi}(\tau_1, \tau_2) = \frac{\tau_0^2 S_0(\tau_1, \tau_0) S_0(\tau_2, \tau_0) S_0(\tau_1, \tau_2)}{Q(\tau_1) Q(\tau_2)}. \quad (24)$$

Некогерентная ОМП длительности (19) радиосигнала может быть найдена как решение уравнения правдоподобия [4] $[dL_{a\varphi}(\tau)/d\tau]_{\tau_m} = 0$ при условии $[d^2L_{a\varphi}(\tau)/d\tau^2]_{\tau_m} < 0$.

Известно [4], что с ростом ОСШ (10) ОМП сходится в среднеквадратическом к истинному значению неизвестного параметра, поэтому будем рассматривать логарифм ФОП (23) в окрестности τ_0 . Применяя метод малого параметра [4], находим статистические характеристики некогерентной ОМП:

$$b_{a\varphi}(\tau_m) = 0, \quad D_{a\varphi}(\tau_m) = V_{a\varphi}(\tau_m) = \frac{1}{z_0^2} \left[\frac{\partial^2 K_{na\varphi}(\tau_1, \tau_2)}{\partial \tau_1 \partial \tau_2} \bigg/ \left(\frac{d^2 S_{na\varphi}(\tau, \tau_0)}{d\tau^2} \right)^2 \right]_{\tau_0}. \quad (25)$$

Подставив функции (5), (6) в выражения (21) и (24), а затем (21) и (24) в (25), получим явный вид рассеяния ОМП длительности радиосигнала с колокольной огибающей (16):

$$V_{a\varphi} = D_{a\varphi} = \frac{\tau_0^2}{z_0^2} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \left(x \frac{df(x)}{dx} \right)^2 dx - \frac{1}{4} \right]^{-1} = \frac{2\tau_0^2}{z_0^2}. \quad (26)$$

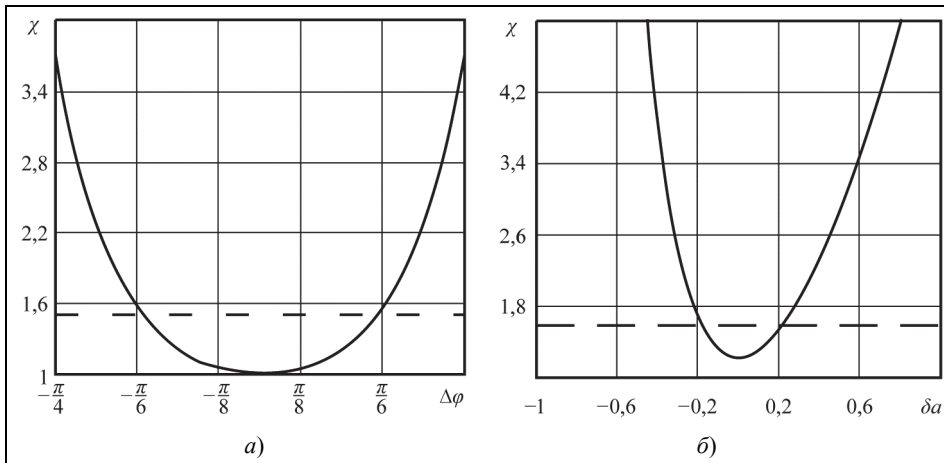


Рис. 2. Графики зависимости проигрыша квазикогерентной КПО длительности и некогерентной ОМП длительности от относительной расстройки амплитуды $\Delta\varphi$ (8) (а) и от относительной расстройки начальной фазы δa (7) (б)

Разделив выражение (26) на условную дисперсию ОМП в случае априори известных амплитуды и начальной фазы (15), получим проигрыш МП-алгоритма для радиосигнала с неизвестными амплитудой и начальной фазой относительно МП-алгоритма с априори известными амплитудой и начальной фазой:

$$\chi_{a\varphi} = \frac{D_{a\varphi}}{D_m} = \frac{3}{2}. \quad (27)$$

Для иллюстрации рационального выбора метода оценки длительности радиосигнала на рис. 2 приведены графики зависимости от расстроек амплитуды и начальной фазы рассеяния квазикогерентной КПО длительности (17), нормированного на рассеяние ОМП (15) и рассеяния некогерентной ОМП длительности (27), нормированного на рассеяние ОМП (15). На рис. 2 приведены графики зависимости величины $\chi = \tilde{V}/V_m$ (18) (сплошные линии) и $\chi_{a\varphi} = V_{a\varphi}/V_m$ (27) (пунктирные линии) от $\Delta\varphi$ (8) при $\delta a = 0,2$ и $z_0 = 5$ (рис. 2,а) и от δa (7) при $\Delta\varphi = \pi/8$ и $z_0 = 5$ (рис. 2,б).

Из рис. 2,а видно, что на интервалах $-\frac{\pi}{4} < \Delta\varphi < -\frac{\pi}{6}$ и $\frac{\pi}{6} < \Delta\varphi < \frac{\pi}{4}$ целесообразнее использовать некогерентную ОМП длительности по сравнению с квазикогерентной КПО длительности, на интервале с $-\frac{\pi}{6} < \Delta\varphi < \frac{\pi}{6}$ – квазикогерентную КПО длительности. Из рис. 2,б видно, что на интервалах $-1 < \delta a < -0,2$ и $0,3 < \delta a < 1$ желательно использовать некогерентную ОМП длительности, на интервале $-0,2 < \delta a < 0,3$ – квазикогерентную КПО длительности.

- Полученные результаты анализа оценок длительности позволяют сделать обоснованный выбор алгоритма оценки в зависимости от имеющейся априорной информации и в зависимости от требований, предъявленных к степени простоты технической реализации алгоритма и к точности оценки. Если расстройка амплитуды и начальной фазы невелики, то целесообразно использовать КП-алгоритм оценки, в противном случае – МП-алгоритм. Величина допустимой расстройки зависит от формы огибающей радиосигнала.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-49-00079).

Постановка задачи и часть решения в данной работе выполнены нашим Учителем – Заслуженным деятелем науки Андреем Павловичем Трифоновым, ушедшим из жизни осенью 2017 г. Авторы выражают глубокую благодарность А.П. Трифонову за возможность совместной работы и великодушное отношение к своим ученикам.

Литература

1. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. М.: Радио и связь. 1983. 319 с.
2. Трифонов А.П., Шинаков Ю.С. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех. М.: Радио и связь. 1986. 264 с.
3. Трифонов А.П., Бутейко В.К. Прием сигнала с неизвестными амплитудой и длительностью на фоне белого шума // Известия ВУЗов. Сер. Радиоэлектроника. 1981. Т. 27. № 8. С. 28–34.
4. Куликов Е.И., Трифонов А.П. Оценка параметров сигналов на фоне помех. М.: Сов. радио. 1978. 296 с.

5. Трифонов А.П., Корчагин Ю.Э., Кондратович П.А. Эффективность оценки длительности сигнала с неизвестной амплитудой // Известия ВУЗов. Сер. Радиоэлектроника. 2011. Т. 54. № 11. С. 3–12.
6. Трифонов А.П., Корчагин Ю.Э., Литвинов Е.В. Квазиправдоподобное обнаружение сигналов с неизвестными амплитудой и длительностью // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Физика. Математика. 2016. № 1. С. 41–49.
7. Трифонов А.П., Корчагин Ю.Э. Квазиправдоподобная оценка времени прихода и длительности сигнала неизвестной формы // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Физика. Математика. 2015. № 2. С. 40–52.
8. Корчагин Ю.Э. Оценка длительности радиоимпульса с неизвестной фазой // Радиоэлектроника. 2013. Т. 56. № 7. С. 29–37.
9. Корчагин Ю.Э. Оценка длительности радиосигнала с неизвестными амплитудой и фазой // Радиотехника. 2013. № 9. С. 11–19.
10. Трифонов А.П., Овчинникова Н.С. Оценка длительности регулярного сигнала с частично неизвестной амплитудой // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Физика. Математика. 2017. № 3. С. 57–65.

Поступила 18 января 2018 г.

Estimation of the duration of a regular radiosignal with a partially unknown amplitude and initial phase

© Authors, 2018

© Radiotekhnika, 2018

Yu.E. Korchagin – Dr.Sc.(Phys.-Math.), Professor, Head of Department of Radiophysics, Voronezh State University

E-mail: korchagin@phys.vsu.ru

N.S. Ovchinnikova – Undergraduate, Department of Radiophysics, Voronezh State University

E-mail: dyshetzka@mail.ru

The estimation problem of a duration of the regular radiosignal with a partially unknown amplitude and initial phase. There are considered two methods of overcoming antecedent parametric indetermination: quasilielihood and maximum likelihood algorithms of estimation. For the considered algorithms several characteristics of estimation of the duration of the radiosignal were determined. Among them are displacement, variance and estimation scattering. Comparison of a certainty of quasilielihood and maximum likelihood estimation has been made.

References

1. Тихонов В.И. Optimal'ny'j priem signalov. M.: Radio i svyaz'. 1983. 319 s.
2. Трифонов А.П., Шинаков Ю.С. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех. M.: Radio i svyaz'. 1986. 264 s.
3. Трифонов А.П., Бутежко В.К. Прием сигнала с неизвестными амплитудой и длительностью на фоне белого шума // Известия ВУЗов. Сер. Радиоэлектроника. 1981. Т. 27. № 8. С. 28–34.
4. Куликов Е.И., Трифонов А.П. Оценка параметров сигналов на фоне помех. M.: Sov. radio. 1978. 296 s.
5. Трифонов А.П., Корчагин Ю.Э., Кондратович П.А. Эффективность оценки длительности сигнала с неизвестной амплитудой // Известия ВУЗов. Сер. Радиоэлектроника. 2011. Т. 54. № 11. С. 3–12.
6. Трифонов А.П., Корчагин Ю.Э., Литвинов Е.В. Квазиправдоподобное обнаружение сигналов с неизвестными амплитудой и длительностью // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Физика. Математика. 2016. № 1. С. 41–49.
7. Трифонов А.П., Корчагин Ю.Э. Квазиправдоподобная оценка времени прихода и длительности сигнала неизвестной формы // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Физика. Математика. 2015. № 2. С. 40–52.
8. Корчагин Ю.Э. Оценка длительности радиоимпульса с неизвестной фазой // Радиоэлектроника. 2013. Т. 56. № 7. С. 29–37.
9. Корчагин Ю.Э. Оценка длительности радиосигнала с неизвестными амплитудой и фазой // Радиотехника. 2013. № 9. С. 11–19.
10. Трифонов А.П., Овчинникова Н.С. Оценка длительности регулярного сигнала с частично неизвестной амплитудой // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Физика. Математика. 2017. № 3. С. 57–65.