КРАТКИЕ НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.391:519.27

НЕЧАЕВ Е. П., КОРЧАГИН Ю. Э.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОВМЕСТНЫХ ОЦЕНОК ДЛИТЕЛЬНОСТИ И ДОППЛЕРОВСКОГО СДВИГА ЧАСТОТЫ СИГНАЛА

В настоящее время достаточно подробно разработаны методы анализа помехоустойчивости оптимальных алгоритмов оценивания параметров сигналов в условиях, когда решающая статистика алгоритма представляет собой дифференцируемый в среднеквадратическом случайный процесс [1, 2], а также если решающая статистика допускает аппроксимацию марковским (недифференцируемым) случайным процессом [3, 4]. Методы анализа эффективности совместных оценок дифференцируемых и разрывных (недифференцируемых) параметров сигналов к настоящему времени неизвестны. Исключение составляет случай, когда дифференцируемым параметром является амплитуда сигнала [3, 4].

Во многих задачах радио- и гидролокации возникает необходимость совместного оценивания длительности и допплеровского сдвига частоты сигнала. В локационных станциях кругового обзора длительность сигнала содержит информацию о размере наблюдаемого объекта, а сдвиг частоты — информацию о скорости его движения. В этом случае длительность сигнала будет разрывным, а допплеровский сдвиг частоты дифференцируемым параметрами сигнала.

Будем считать, что в течение интервала времени $[0, T]$ на вход приемного устройства поступает аддитивная смесь $x(t) = s(t, \Omega_0, \tau_0) + n(t)$ полезного сигнала

$$s(t, \Omega_0, \tau_0) = \begin{cases} a\cos[(\omega + \Omega_0)t + \psi(t)], & 0 \le t \le \tau_0 \\ 0, & \tau_0 < t \le T \end{cases},$$

и гауссовского белого шума $n(t)$ с односторонней спектральной плотностью N_0. Здесь: a — амплитуда, τ_0 — длительность, Ω_0 — допплеровский сдвиг, ω — несущая частота сигнала, $\psi(t)$ — закон фазовой модуляции (манипуляции).

Согласно методу максимального правдоподобия [1, 3] оптимальное приемное устройство формирует логарифм функционала отношения правдоподобия

$$M(\Omega, \tau) = \frac{2}{N_0}\int_0^T x(t)\, s(t, \Omega, \tau)\, dt - \frac{a^2\tau}{2N_0} \qquad (1)$$

и в качестве оценок Ω_m, τ_m величин Ω_0, τ_0 принимает координаты положения абсолютного максимума функционала (1) в априорной области значений параметра сигнала.

Функционал (1) представляет собой линейное преобразование гауссовского случайного процесса $n(t)$. Поэтому распределение решающей статистики (1) оптимального алгоритма будет гауссовским. Среднее значение (сигнальная функция) и функция корреляции функционала (1) в окрестности точки (Ω_0, τ_0) определяются выражениями

$$S(\Omega, \tau) = z^2\,[\min(\tau_0, \tau)/\tau_0 - \tau_0^2(\Omega - \Omega_0)^2/6 - \tau/2\tau_0], \qquad (2)$$

$$K(\Omega_1, \Omega_2, \tau_1, \tau_2) = z^2\,[\min(\tau_1, \tau_2)/\tau_0 - \tau_0^2(\Omega_1 - \Omega_2)^2/6], \qquad (3)$$

где $z^2 = a^2\tau_0/N_0$ — отношение сигнал—шум для принятого сигнала. Согласно (3) решающая статистика (1) дифференцируема в среднеквадратическом по параметру Ω и недифференцируема по параметру τ.

Введем в окрестности точки (Ω_0, τ_0) два независимых гауссовских случайных процесса $M_1(\tau)$ и $M_2(\Omega)$ со средними значениями:

$$S_1(\tau) = z^2\,[\varepsilon - 1 + \min(\tau_0, \tau)/\tau_0 - \tau/2\tau_0], \qquad (4)$$

$$S_2(\Omega) = z^2\,[1 - \varepsilon - \tau_0^2(\Omega - \Omega_0)^2/6] \qquad (5)$$

и корреляционными функциями:

$$K_1(\tau_1, \tau_2) = z^2\,[\varepsilon - 1 + \min(\tau_1, \tau_2)/\tau_0], \qquad (6)$$

$$K_2(\Omega_1, \Omega_2) = z^2\,[1 - \varepsilon - \tau_0^2(\Omega_1 - \Omega_2)^2/6], \qquad (7)$$

где ε — некоторое число из интервала (0, 1). Тогда среднее значение суммы процессов $M_1(\Omega)$ и $M_2(\tau)$ совпадает с (2), а функция корреляции суммы совпадает с (3). Поскольку гауссовский случайный процесс однозначно определяется своим средним значением и корреляционной функцией, решающую статистику можно представить в виде:

$$M(\Omega, \tau) = M_1(\tau) + M_2(\Omega). \quad (8)$$

Из выражения (8) следует, что положение максимума статистики $M(\Omega, \tau)$ по переменной τ совпадает с положением максимума процесса $M_1(\tau)$, а положение максимума решающей статистики по переменной Ω совпадает с положением максимума $M_2(\Omega)$. Значит, характеристики совместных оценок максимального правдоподобия Ω_m, τ_m параметров Ω_0, τ_0 определяются свойствами процессов $M_2(\Omega)$ и $M_1(\tau)$ соответственно. Ввиду того, что в окрестности точки истинных значений (Ω_0, τ_0) процессы $M_1(\tau)$ и $M_2(\Omega)$ статистически независимы, оценки максимального правдоподобия Ω_m и τ_m, с увеличением отношения сигнал—шум z, будут асимптотически независимыми.

Согласно (4), (6) процесс $M_1(\tau)$ представляет собой марковский гауссовский случайный процесс с кусочно-постоянными коэффициентами сноса и диффузии. Функция распределения положения абсолютного максимума этого процесса находится из решения задачи о достижении границ марковским случайным процессом [3]. Решая аналогично [3] соответствующее уравнение Фоккера—Планка—Колмогорова, получаем распределение положения абсолютного максимума процесса $M_1(\tau)$. Из этого распределения находим условное смещение и рассеяние оценки длительности сигнала при фиксированных значениях параметров τ_0 и Ω_0:

$$d(\tau_m \mid \Omega_0, \tau_0) = \langle \tau_m - \tau_0 \rangle = 0, \quad (9)$$

$$V(\tau_m \mid \Omega_0, \tau_0) = \langle (\tau_m - \tau_0)^2 \rangle = 26\,\tau_0^2 / z^4. \quad (10)$$

Точность выражений (9), (10) возрастает с увеличением отношения сигнал—шум z. Характеристики оценки длительности сигнала (9), (10) в алгоритме совместного оценивания длительности и доплеровского сдвига частоты совпадают с характеристиками алгоритма оценивания длительности при условии, что другие параметры сигнала точно известны [3].

Согласно (5), (7) случайный процесс $M_2(\Omega)$ является дифференцируемым в среднеквадратическом гауссовским случайным процессом. Тогда при достаточно больших значениях отношения сигнал—шум z условное смещение и рассеяние оценки доплеровского сдвига частоты можно записать в виде [1]:

$$d(\Omega_m \mid \Omega_0, \tau_0) = \langle \Omega_m - \Omega_0 \rangle = 0, \quad (11)$$

$$V(\Omega_m \mid \Omega_0, \tau_0) = \langle (\Omega_m - \Omega_0)^2 \rangle = 3 / z^2 \tau_0^2. \quad (12)$$

При известной длительности сигнала характеристики оценки доплеровского сдвига частоты определяются выражениями (11), (12).

Следовательно, смещение и рассеяние оценки доплеровского сдвига частоты в совместном алгоритме совпадают со смещением и рассеянием оценки сдвига частоты сигнала, длительность которого известна.

Таким образом, представление решающей статистики оптимального алгоритма в виде суммы дифференцируемой и недифференцируемой компонент позволило провести расчет характеристик алгоритма совместного оценивания дифференцируемого и разрывного параметров сигнала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Куликов Е. И., Трифонов А. П.* Оценка параметров сигналов на фоне помех.— М. : Сов. радио, 1978.— 296 с.
2. *Тихонов В. И.* Оптимальный прием сигналов.— М. : Радио и связь, 1983.— 320 с.
3. *Трифонов А. П., Шинаков Ю. С.* Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех.— М. : Радио и связь, 1986.— 264 с.
4. *Трифонов А. П., Бутейко В. К.* Прием сигнала с неизвестными амплитудой и длительностью на фоне белого шума // Радиоэлектроника.— 1984.— Т. 27.— № 8.— С. 28—34. (Изв. высш. учеб. заведений).

Воронежский госуниверситет.

Поступила в редакцию 20.01.95.

УДК 621.396.96

МИТРОФАНОВ Д. Г.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СИНТЕЗА ДВУМЕРНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В [1] для радиолокационного распознавания воздушных целей предложено использовать их двумерные радиолокационные изображения (РЛИ), которые можно получить методом триангуляции в станциях сопровождения целей с узкополосными сигналами при инверсном синтезировании апертуры.

Эксперимент целесообразно проводить методом электродинамического масштабного моделирования в виду относительной дешевизны и оперативности, возможности получения радиолокационных характеристик (РЛХ) целей на этапе их проектирования. В состав лабораторного измерительного комплекса входят элементы: безэховая камера, радиолокационная станция миллиметрового диапазона, устройство регистрации результатов измерений с ЭВМ для записи и обработки данных, поворотное