УДК 621.391.26

Ю. А. ПАДИРЯКОВ, асп.

АДАПТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ШУМОВЫХ СИГНАЛОВ ПО КРИТЕРИЮ МАКСИМАЛЬНОГО ПРАВДОПОДОБИЯ

В работе [1] с позиций адаптивного байесовского подхода получен алгоритм обнаружения случайного гауссовского стационарного в пределах интервала наблюдения сигнала на фоне случайной гауссовской стационарной помехи при наблюдении двух реализаций A и B

$$l_1 = \sum_{i=1}^{N} \left[(m+n) \ln \frac{Y_i + Z_i}{m+n} - m \ln \frac{Y_i}{m} - n \ln \frac{Z_i}{n} \right] \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} c, \qquad (1)$$

где Z_i и Y_i — энергии на интервалах T_A и T_B огибающих откликов идеальных полосовых фильтров с единичными коэффициентами передачи в полосах Δf и центральными частотами $f_i = f_1 + i\Delta f$ на реализации A и B соответственно; Δf — полоса частот, в которой спектральные плотности мощности сигнала $G_c(\omega)$ и помехи $G_п(\omega)$ изменяются несущественно; N — количество фильтров, укладывающихся в полосу приема $\Delta F = N\Delta f$, $n = \Delta f T_A$, $m = \Delta f T_B$; c — порог. При этом предполагается, что выборка A по гипотезе H_1 представляет собой сумму сигнала и помехи, а по гипотезе H_0 — только помеху; выборка B по обеим гипотезам принадлежит помехе, имеющей такую же спектральную плотность мощности, как и помеха выборки A. Сигнал, помеха в A и помеха в B попарно независимы, а их спектральные плотности мощности априори неизвестны. Z_i/n, Y_i/m, $(Z_i+Y_i)/(m+n)$ имеют смысл условных по гипотезам оценок максимального правдоподобия неизвестных спектральных плотностей мощности смеси и помехи соответственно. При синтезе алгоритма (1) максимизацией условных по гипотезам совместных функций правдоподобия реализаций A и B по неизвестным спектральным плотностям мощности смеси и помехи не учитывалось оговоренное в постановке задачи равенство спектральных плотностей мощности помехи в выборках A и B. При этом спектральная плотность мощности смеси всегда больше спектральной плотности мощности помехи. Если учесть это при решении уравнений правдоподобия, ограничив снизу область возможных решений для оценки спектральной плотности мощности смеси оценкой помехи по гипотезе H_0, то для случая равных размеров выборок $m = n$ получим адаптивный алгоритм максимального правдоподобия с ограничениями

$$l_2 = \sum_{i=1}^{N} \ln \frac{X_i + 1}{2X_i^{0,5}} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} c, \text{ где } x_i = \begin{cases} z_i/Y_i \text{ при } Z_i \geqslant Y_i, \\ 1 \text{ при } Z_i \leqslant Y_i. \end{cases} \qquad (2)$$

Для оценки влияния такого «физического» ограничения проведен сравнительный анализ помехоустойчивости алгоритмов (1) и (2) на широком классе моделей сигналов и помех.

При больших N (порядка 50 ... 100), в силу центральной предельной теоремы теории вероятности, плотности вероятности статистик l_1, l_2 близки к гауссовской, и помехоустойчивость алгоритмов (1) и (2) определяется первыми двумя моментами этих статистик. При фиксированной вероятности ложных тревог вероятность правильного обнаружения

$$P = \Phi\left\{[m(l/H_1) - m(l/H_0) - \Phi^{-1}(1-F)\, D^{0,5}(l/H_0)]\, D^{-0,5}(l/H_1)\right\}, \quad (3)$$

где $\Phi(...)$ и $\Phi^{-1}(...)$ — интеграл вероятности и его аргумент; $m(...)$ и $D(...)$ — математическое ожидание и дисперсия. Для малых отношений сигнал/помеха $q(\omega) = G_c(\omega)/G_п(\omega) \ll 1$ может быть получено выражение для вероятности правильного обнаружения алгоритмов (1) и (2)

$$P = \Phi\left\{K_1 (n/N)^{0,5} \sum_{i=1}^{N} q_i + K_2 n N^{-0,5} \sum_{i=1}^{N} q_i^2 - \Phi^{-1}(1-F)\right\}, \quad (4)$$

где $q_i = G_{ci}/G_{пi}$ — отношение спектральных плотностей мощности сигнала и помехи в пределах i-го частотного интервала; K_1 и K_2 — коэффициенты, зависящие от вида алгоритма. Расчетами на ЭВМ получены значения K_1 и K_2 для алгоритмов (1) и (2), $m = n = 1$, 10, 100 (см. таблицу).

Зависимость помехоустойчивости алгоритмов (1) и (2) исследовалась при нахождении вектора параметров $\vec{q}$ в подпространстве Q_1 пространства параметров Q, удовлетворяющем уравнению $n \sum_{i=1}^{N} q_i^2 = a^2 = \mathrm{const}$, где помехоустойчивость оптимального неадаптивного алгоритма обнаружения

$$l_{opt} = \sum_{i=1}^{N} \frac{Z_i G_{ci}}{G_{пi}(G_{пi} + G_{ci})} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} c \quad (5)$$

постоянна и описывается выражением

$$P_5 = \Phi\left\{\left(n \sum_{i=1}^{N} q_i^2\right)^{0,5} - \Phi^{-1}(1-F)\right\}. \quad (6)$$

Как видно из таблицы, при $\vec{q} \in Q_1$ помехоустойчивость алгоритма (1) также постоянна, соотношение зависящих от $\vec{q}$ членов в (4) и (6), называемое в работе [1] энергетическим проигрышем для Q_1, соответствующего $P_5 = 0,9$ и $F = 10^{-5}$, $N = 100$, $m = n \geqslant 10$, равно 0,2 и убывает с ростом количества неизвестных параметров как $KN^{-0,5}$.

Помехоустойчивость алгоритма (2) иначе зависит от положения $\vec{q}$ в Q_1. Квадратичный член $K_2 n N^{-0,5} \sum_{i=1}^{N} q_i^2$ постоянен при $\vec{q} \in Q_1$, а линейный член $K_1 (n/N)^{0,5} \sum_{i=1}^{N} q_i$ максимален в направлении единичного вектора пространства параметров и убывает при движении к так называемым «вырожденным точкам» $q_{i \neq j} = 0$, $q_j = an^{-0,5}$, соответствующим обнаружению узкополосного сигнала с неизвестной центральной частотой в широком диапазоне.

n	Алгоритм			
	1		2	
	K_1	K_2	K_1	K_2
1	0	0,2	0,37	0
10	0	0,33	0,47	0,12
100	0	0,35	0,5	0,2

Среднее значение энергетического проигрыша алгоритма (2) алгоритму (5) на подпространстве Q_1 при $N=100$, $m=n \geqslant 20$ равно 0,5, что примерно на 5 дБ лучше, чем у алгоритма (1). Кроме того, отсутствие линейного члена в выражении для помехоустойчивости алгоритма (1) говорит о том, что производная, зависящего от $\vec{q}$ члена в выражении (4), меняет знак в точке $q=0$, т. е. при несовпадении уровней помехи в реализациях A и B возможны отрицательные приращения аргумента интеграла вероятности, обусловленные сигналом, что резко снижает помехоустойчивость обнаружения.

Таким образом, введение «физических» ограничений на области возможных значений оценок максимального правдоподобия спектральной плотности мощности смеси сигнала и помехи при большом количестве неизвестных параметров повышает среднюю помехоустойчивость адаптивного алгоритма обнаружения шумовых сигналов на фоне шумовых помех по критерию максимального правдоподобия и одновременно снижает его чувствительность к паразитному параметру — несовпадению уровней помехи в сигнальном (реализация A) и опорном (реализация B) каналах.

1. *Репин В. Г. Тартаковский Г. П.* Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. М., Сов. радио, 1977. 432 с.

Поступила в редколлегию 19.06.81

УДК 621.317.77

Л. Д. ОГОРОДНИЙЧУК, канд. техн. наук

УМЕНЬШЕНИЕ ЧИСЛА ОПЕРАЦИЙ ПРИ ПОВЕРКЕ ФАЗОМЕТРОВ

Разработанный в работе [1] метод измерения фазовой погрешности фазометров получил широкое распространение и дальнейшее развитие [2, 3]. Число операций поверки, выполняемых градуированным (ГФ) и неградуированным (НФ) фазовращателями