

# НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ УЗКОПОЛОСНОГО РАДИОСИГНАЛА С НЕИЗВЕСТНОЙ НЕСУЩЕЙ ЧАСТОТОЙ НА ФОНЕ ГАУССОВСКИХ ШУМОВ

Ю.Т. Карманов, А.Н. Николаев

## NONPARAMETRIC NARROWBAND DETECTION OF THE SIGNAL WITH UNKNOWN CARRIER FREQUENCY WITH A BACKGROUND GAUSSIAN NOISE

Y. T. Karmanov, A. N. Nikolaev

Предложен алгоритм непараметрического обнаружения узкополосного сигнала в условиях гауссовских шумов. Основными достоинствами алгоритма являются отсутствие необходимости в априорной информации о несущей частоте сигнала и независимость порога обнаружения от уровня шумов. При помощи моделирования получены характеристики обнаружения предлагаемого алгоритма.

*Ключевые слова:* обнаружение радиосигнала, узкополосные радиосигналы.

An algorithm for nonparametric detection of narrow-band signal in a Gaussian noise is presented. The main advantages of the algorithm is a no need for a priori information about the carrier frequency signal and the independence of the threshold of detection of the level of noise. With the help of simulation were obtained characteristics of the proposed detection algorithm.

*Keywords:* signal detection, narrow-band radio-signals.

### Введение

Оптимальное обнаружение узкополосного радиосигнала на фоне гауссовских шумов требует априорного знания параметров обнаруживаемого радиосигнала, в частности его несущей частоты  $f_c$ , либо требует ее предварительной оценки. Кроме того, необходимо знать спектральную плотность действующих шумов.

Это не всегда приемлемо, поэтому представляют интерес непараметрические алгоритмы обнаружения сигнала, которые не требуют априорного знания характеристик обнаруживаемого радиосигнала и шумов, хотя они имеют худшие характеристики обнаружения сигналов, чем оптимальные.

В [1] рассмотрен класс «фазовых» обнаружителей, в которых для обнаружения используются «текущая фаза» наблюдаемой смеси сигнала и шума  $x(t)$  равная:

$$\varphi(t) = \arctg \frac{x^Q(t)}{x^I(t)},$$

где  $x^I(t), x^Q(t)$  - синфазная и квадратурная составляющие  $x(t)$ , полученные относительно опорного колебания с частотой  $f_0$ .

Показано, что в таких обнаружителях уровень вероятности ложных тревог  $P_F$  не зависит от спектральной плотности шума  $N_\sigma$ .

Однако сам алгоритм обнаружения зависит от параметров обнаруживаемого сигнала, в частности от его несущей частоты  $f_c$ .

Рассматривались алгоритмы обнаружения, основанные на простом накоплении текущей фазы  $\varphi(t)$ . Их серьезным недостатком является зависимость вероятности правильного обнаружения  $P_D$  от значения несущей частоты сигнала. В частности при малых расстройках  $\Delta f_c = f_c - f_0$   $P_D \approx 0$ .

Актуальным является поиск алгоритмов непараметрического обнаружения узкополосных сигналов на фоне шумов, свободных от указанных недостатков.

Карманов Юрий Трофимович - д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой цифровых радиотехнических систем ЮУрГУ; [ea@drts.susu.as.ru](mailto:ea@drts.susu.as.ru)

Николаев Андрей Николаевич - старший преподаватель кафедры цифровых радиотехнических систем ЮУрГУ; [ea@drts.susu.ac.ru](mailto:ea@drts.susu.ac.ru)

Karmanov Yuri Trofimovich - PhD, professor, head of Digital radio-technical systems department of SUSU; [ea@drts.susu.as.ru](mailto:ea@drts.susu.as.ru)

Nikolaev Andrey Nikolaevich - senior lecturer of Digital radio-technical systems department of SUSU; [ea@drts.susu.ac.ru](mailto:ea@drts.susu.ac.ru)

**Постановка задачи**

Пусть наблюдается колебание  $x(t)$ , состоящее из шумового колебания  $n(t)$  и появляющегося на его фоне в момент времени  $t = t_0$  узкополосного радиосигнала  $S(t)$  длительностью  $T_c$  в виде

$$S(t) = A_c(t) \cos[2\pi f_c t + \varphi_c(t)],$$

где  $A_c(t)$  – амплитуда сигнала.

Будем полагать.

1. Колебание  $n(t)$  является белым гауссовским шумом со спектральной плотностью  $N_0$ .

2. Значение несущей частоты  $f_c$  обнаруживаемого сигнала  $S(t)$  лежит в диапазоне  $\left[ f_0 - \frac{\Delta F}{2}, f_0 + \frac{\Delta F}{2} \right]$ , точное значение  $f_c$  неизвестно.

3. Существует такой интервал  $\Delta\tau_0$ , в течение которого значение внутрисигнальной модуляции не изменяется и  $\varphi_c(t) \equiv \varphi_{\Delta\tau_0}$  при  $t \in \Delta\tau_0$  и  $A_c(t) \equiv A_{\Delta\tau_0}$ .

4. Предварительно проведено выделение квадратур  $x^I(t), x^Q(t)$  колебания  $x(t)$  относительно несущей частоты  $f_0$ . Они имеют вид:

$$\begin{aligned} x^I(t) &= A_{\Delta\tau_0} \cos[2\pi \Delta f_c t + \varphi_{\Delta\tau_0}] + n^I(t) \\ x^Q(t) &= A_{\Delta\tau_0} \sin[2\pi \Delta f_c t + \varphi_{\Delta\tau_0}] + n^Q(t) \end{aligned} \quad \text{если}$$

сигнал есть ( $H_1$ );

$$\begin{aligned} x^I(t) &= n^I(t) \\ x^Q(t) &= n^Q(t) \end{aligned} \quad \text{если сигнала нет } (H_0).$$

Здесь  $n^I(t), n^Q(t)$  – квадратурные составляющие шума.

Задача состоит в обнаружении данного сигнала, т.е. определении момента его появления  $t = t_0$  и окончания  $t = t_0 + T_c$ .

**Алгоритм обнаружения**

Проведем дискретизацию квадратур колебания  $x(t)$  с частотой дискретизации  $f_d \geq \Delta F$  и представим наблюдаемое колебание в виде двух последовательностей отсчетов квадратур:

$$\begin{aligned} x^I(1), x^I(2), \dots, x^I(k), \dots \\ x^Q(1), x^Q(2), \dots, x^Q(k), \dots \end{aligned}$$

Перейдем к отсчетам текущей фазы колебания  $x(t)$ :

$$\varphi(k) = \text{arctg} \frac{x^Q(k)}{x^I(k)},$$

получим последовательность отсчетов:

$$\varphi(1), \varphi(2), \dots, \varphi(k), \dots$$

Вычислим на основании их последовательность  $\Delta\varphi(k)$ :

$$\Delta\varphi(k) = \varphi(k) - \varphi(k - m), \tag{1}$$

где  $m$  – некоторый целый параметр. Получим:

$$\Delta\varphi(1), \Delta\varphi(2), \dots, \Delta\varphi(k), \dots$$

Сформируем из них статистику

$$Z_k = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^R |\Delta\varphi(k - i + 1) - \Delta\varphi(k - i)|^2. \tag{2}$$

Решение о наличии ( $H_1$ ) или отсутствии ( $H_0$ ) сигнала в наблюдаемой смеси  $x(t)$  принимается на основе сравнения величины  $Z_k$  с порогом  $g$ :

$$\begin{aligned} &H_0 \\ &> \\ &Z_k < g. \\ &H_1 \end{aligned} \tag{3}$$

Величина  $R$  в выражении (1) определяется:

$$R \approx \frac{\Delta\tau_0}{\Delta t_d},$$

где  $\Delta t_d = \frac{1}{f_d}$ .

Предлагаемый алгоритм основан на следующем.

1. При наличии обнаруживаемого сигнала, как известно [1], текущая фаза  $\varphi(k)$  случайна и имеет математическое ожидание и дисперсию:

$$M[\varphi(k)] = 2\pi \Delta f_c t_k + \varphi_{\Delta\tau_0};$$

$$D[\varphi(k)] = \frac{1}{d_c^2},$$

где  $d_c^2 = \frac{A_{\Delta\tau_0}^2}{N_0}$  – отношение сигнал-шум.

В таком случае при наличии сигнала величина (1) также случайна и имеет

$$M[\Delta\varphi(k)] = 2\pi \Delta f_c m \Delta t_d;$$

$$D[\varphi(k)] = \frac{2}{d_c^2}.$$

Тогда:

$$M[(\Delta\varphi(k - i + 1) - \Delta\varphi(k - i))] \equiv 0;$$

$$D[(\Delta\varphi(k - i + 1) - \Delta\varphi(k - i))] \equiv \frac{4}{d_c^2}.$$

Накапливая статистику (2), получим:

$$M\left[\frac{Z_k}{H_1}\right] = \frac{4}{d_c^2};$$

$$D\left[\frac{Z_k}{H_1}\right] \approx \frac{2 \cdot 16}{R(d_c^2)^2} = \frac{32}{R(d_c^2)^2}.$$

2. При отсутствии сигнала текущая фаза  $\varphi(k)$  распределена равномерно в интервале  $(-\pi, \pi)$  и не зависит от интенсивности шума  $N_0$ . Следовательно, и  $\Delta\varphi(k)$ , и статистика  $Z_k$  не зависят от  $N_0$ :

$$M\left[\frac{Z_k}{H_0}\right] = \frac{4 \cdot 4\pi^2}{12} = 13,1;$$

$$D\left[\frac{Z_k}{H_0}\right] \approx \frac{2 \cdot (16\pi^2)^2}{R \cdot 12^2} = \frac{346}{R}.$$

Таким образом, вероятность ложной тревоги  $P_F$  в обнаружителе (3) от интенсивности шумов не зависит и определяется только значением порога  $g$ .

Качество алгоритма обнаружения характеризуется семейство кривых  $P_D(d_c^2)$  (зависимости вероятности правильного обнаружения от соотношения сигнал-шум) для различных фиксированных значений  $P_F$ . Вычисление характеристик обнаружения предлагаемого алгоритма проводилось при помощи имитационного моделирования с использованием возможностей пакета Matlab [2].

### Результаты моделирования

Моделирование проводилось для набора исходных данных, приведенных в табл. 1.

Таблица 1  
Исходные данные моделирования

Параметр	$b$	$m$	$R$
Значение	8	1	16

Параметр  $b$  (см. табл. 1) определяет число разрядов, используемых при квантовании отсчетов квадратурных составляющих колебания  $x(t)$ .

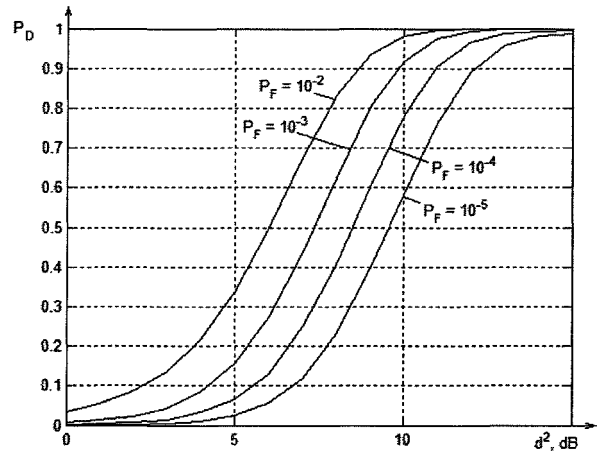
На первом этапе моделирования были получены значения порога для заданных уровней вероятности ложной тревоги  $P_F$  (табл. 2).

Таблица 2  
Результаты расчета порога обнаружения

$P_F$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$
Нормированный порог $g/g_{\max}$	0,0849	0,0632	0,0472	0,0353

В табл. 1  $g_{\max} = 2^{b-1}$  – максимальное значение порога для заданного числа разрядов, используемых при квантовании.

Для рассчитанных значений порога на основе (2) и (3) было получено семейство кривых обнаружения (см. рисунок).



Кривые обнаружения

### Выводы

Предлагаемый алгоритм обнаружения не требует априорной информации о несущей частоте сигнала. Вероятность ложной тревоги в таком алгоритме не зависит от уровня шумов и определяется только значением порога.

Характеристики обнаружения несущественно отличаются от характеристик оптимального обнаружителя [3]. Это отличие составляет несколько дБ.

### Литература

1. Левин, Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б.Р. Левин. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Радио и связь, 1989. — 625 с.
2. Гултыяев, А. Визуальное моделирование в среде Matlab: учебный курс / А. Гултыяев. — СПб.: Питер, 2000. — 432 с: ил.
3. Перов, А.И. Статистическая теория радиотехнических систем: учебное пособие для вузов / А.И. Перов. — М.: Радиотехника, 2003. — 400 с: ил.

Поступила в редакцию 16 марта 2009 г.