

УДК 621.391

© С. В. Дворников

МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ ДИАПАЗОНА ВЧ НА ОСНОВЕ ДВУХЭТАПНОГО АЛГОРИТМА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ

Предлагается метод обнаружения сигналов на основе двухэтапного алгоритма. Рассматривается один из подходов оптимизации процедур принятия решения по минимаксному критерию. Обосновывается вариант автоматического выбора порога отображения без предварительного обучения системы. Приводятся результаты практического эксперимента.

ВВЕДЕНИЕ

Для широкодиапазонных систем радиомониторинга важным моментом является автоматизация процедур обнаружения излучений. Прежде всего это вызвано априорной неопределенностью о статистических параметрах каждого из сигналов, составляющих входной поток. Указанные условия в значительной степени затрудняют выбор порога принятия решения при обработке входной реализации. С одной стороны, желательно не допустить значительного уровня α ложной тревоги (ошибок первого рода), а с другой — минимизировать вероятность пропуска цели β (ошибок второго рода)*. Таким образом, задача поиска компромиссного решения является актуальной и значимой для построения эффективных алгоритмов обнаружения сигналов в широкой полосе. Одним из возможных решений является оптимизация условий принятия решения по выбранному порогу обнаружения.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

С позиций статистической теории радиотехники задача обнаружения сигнала на фоне помех состоит в определении алгоритма обработки наблюдаемого процесса $x(t)$, который может быть только помехой $\xi(t)$ или комбинацией сигнала $s(t)$ и помехи $\xi(t)$. При помощи этого алгоритма выносятся решение о наличии или отсутствии сигнала

в наблюдаемом процессе посредством проверки статистических гипотез о наличии сигнала $H_1: x(t) = s(t) \oplus \xi(t)$ в обрабатываемой реализации или его отсутствии $H_0: x(t) = \xi(t)$. Здесь символ $\oplus$ означает произвольное взаимодействие помехи с сигналом [1]. Для широкодиапазонных систем под $s(t)$ подразумевается совокупный сигнал.

В [2] для рассматриваемых условий обоснован выбор решающего правила на основе критерия максимального правдоподобия. Однако синтез оптимальных алгоритмов обнаружения даже для данного критерия возможен лишь при априорных данных об условной плотности вероятности $\omega_n(\mathbf{x} | H_0)$ (функция правдоподобия) выборки $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$, где n — длина выборки, в предположении, что сигнал $s(t)$ отсутствует, и соответственно $\omega_n(\mathbf{x} | H_1)$ — в предположении наличия сигнала в обрабатываемой выборке. Поэтому решающая функция, заданная на выборочном пространстве $\mathbf{X}$,

$$\Phi(x) = \begin{cases} 1, & x \in \mathbf{X}_1 \\ 0, & x \in \mathbf{X}_0 \end{cases} \quad (1)$$

строится относительно G_p порога, разбивающего указанное пространство принятия решения на $\mathbf{X}_1$ — область принятия гипотезы H_1 и $\mathbf{X}_0$ — область принятия гипотезы H_0 , преимущественно только на основе субъективных данных. В частности в [2] предложено решение об обнаружении сигналов по критерию максимального правдоподобия принимать по порогу разбиения, рассчитываемого на основе статистических параметров входной реализации. Однако такой подход не является оптимальным с точки зрения минимизации α ложной тревоги при максимизации вероятности обнару-

*) Автор приносит извинения читателям за то, что в статье "Метод обнаружения на основе посимвольного перемножения реализаций спектра наблюдаемого процесса с автоматическим расчетом порога принятия решения" (Научное приборостроение, 2004, № 4) понятие ложная тревога было определено как ошибка второго рода.

жения $P = 1 - \beta$. Поэтому целью данной работы является поиск подходов к оптимизации процедуры принятия решения при обнаружении сигналов по критерию максимального правдоподобия.

ДВУХЭТАПНЫЙ АЛГОРИТМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ

Для обоснования этапов оптимизации рассмотрим ситуацию обнаружения в полосе 50 кГц реализации $s_0(t)$, состоящей из восьми сигналов диапазона ВЧ. В качестве исходных были выбраны сигналы частотной манипуляции (ЧМ) ЧМ2 384 Гц, 192 бод; ЧМ2 450 Гц, 50 бод; ЧМ8 250 Гц, 125 бод; сигнал с минимальным частотным сдвигом со скоростью 200 бод; сигналы фазовой манипуляции (ФМ) ФМ2 1800 бод, ФМ4 1200 бод, ФМ8 2400 бод; сигнал амплитудной манипуляции (АМ) АМ 20 бод. Выбор сигналов позволяет имитировать типовую радиоэлектронную обстановку для диапазона ВЧ. На рис. 1 представлен спектр входной реализации $x_0(t) = s_0(t) + \xi(t)$ совокупности указанных сигналов при отношении сигнал/шум (ОСШ) 12 дБ. Здесь ОСШ измерялась в полосе 3 кГц.

В [2] обоснован подход, позволяющий решить задачу выбора порога принятия решения на основе расчета статистических параметров входной реализации. С этой целью предложено спектральный

массив входной реализации разделять с помощью так называемого порога разбиения G_p на области X_1 и X_0 . Затем для каждой из областей строить условные распределения $w_n(x_1, \dots, x_n | s_1)$ и $w_n(x_1, \dots, x_n | s_0)$, считая, что значения выборки, превысившие порог разбиения, являются только сигнальными компонентами. Здесь s_1 — состояние наличие, а s_0 — состояние отсутствия сигнала в принятой реализации $x(t)$. А окончательное решение об обнаружении принимать по результатам статистической обработки сформированных массивов.

С целью оптимизации предложенных в [2] процедур построим условные распределения $w_n(x_1, \dots, x_n | s_1)$ и $w_n(x_1, \dots, x_n | s_0)$ от реализации $x_0(t)$, выбрав в качестве порога разбиения обоснованное там же значение $G_p = 3 \cdot m_1\{y_0(f)\}$. Здесь $m_1\{*\}$ — функция условных средних (статистический начальный момент первого порядка); $y_0(f)$ — спектральное преобразование реализации $x_0(t)$. Искомое распределение представлено на рис. 2.

Очевидно, что для полученных распределений оптимальным порогом принятия решения будет значение, соответствующее равенству

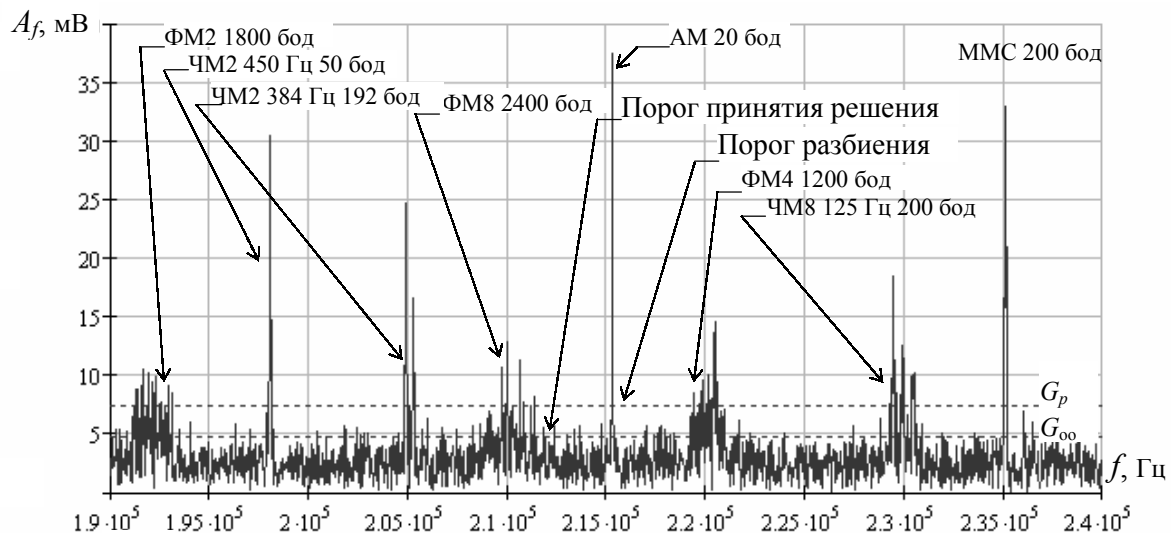


Рис. 1. Совокупный спектр восьми сигналов диапазона ВЧ в полосе 50 кГц при ОСШ 12 дБ

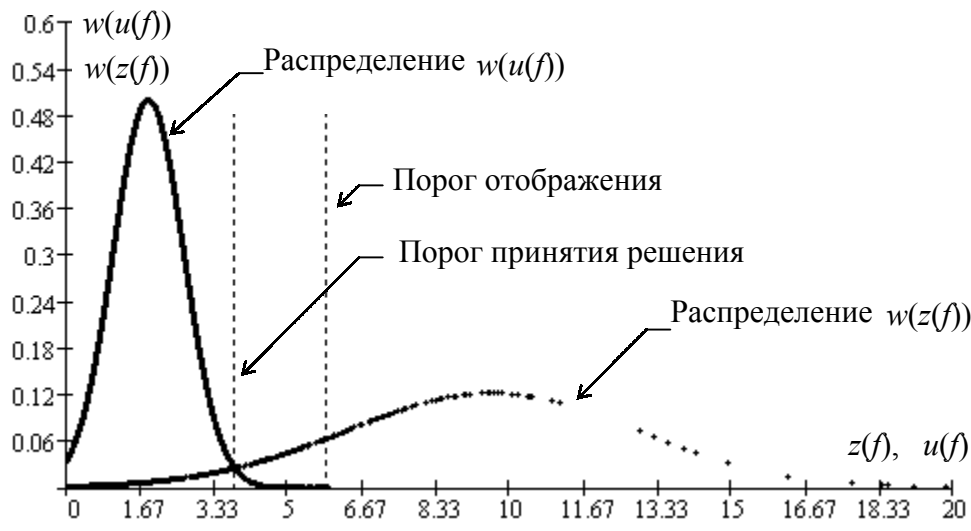


Рис. 2. Распределения $w(z(f))$ и $w(u(f))$ спектральных компонент, соответственно превысивших порог и не превысивших его, при ОСШ 12 дБ

$$w(z(f)) = w(u(f)), \quad (2)$$

где $z(f)$ — спектральное представление компонент, превысивших порог разбиения и потому считающихся сигнальными, а $u(f)$ — спектральное представление компонент, не превысивших порог разбиения и потому считающихся шумовыми.

Однако величина порога разбиения не является оптимальным решением. Для его нахождения представим распределения, определяющие условие (2), следующими аналитическими выражениями:

$$w_{\xi}(u(f)) = \frac{1}{\sigma_{\xi}(u(f))\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(u(f) - m_{\xi}(u(f)))^2}{2 \cdot \sigma_{\xi}^2(u(f))}\right)$$

и

$$w_s(z(f)) = \frac{1}{\sigma_s(z(f))\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(z(f) - m_s(z(f)))^2}{2 \cdot \sigma_s^2(z(f))}\right),$$

где $\sigma_{\xi}^2(u(f))$ и $\sigma_s^2(z(f))$ — дисперсии распределений для шумовых и сигнальных компонентов соответственно; $m_{\xi}(u(f))$ и $m_s(z(f))$ — функции условных средних распределений шума и сигнала соответственно. Тогда для равенства (2) запишем:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sigma_s(z(f))\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(z(f) - m_s(z(f)))^2}{2 \cdot \sigma_s^2(z(f))}\right) = \\ = \frac{1}{\sigma_{\xi}(u(f))\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(u(f) - m_{\xi}(u(f)))^2}{2 \cdot \sigma_{\xi}^2(u(f))}\right). \end{aligned} \quad (3)$$

Решение уравнения (3) относительно аргумента и будет являться искомым значением порога принятия решения для рассмотренных условий:

$$\begin{aligned} G_{00} = \frac{1}{\sigma_{\xi}^2(u(f)) - \sigma_s^2(z(f))} \times \\ \times \{m_s(z(f)) \cdot \sigma_{\xi}^2(u(f)) - m_{\xi}(u(f)) \cdot \sigma_s^2(z(f)) \pm \\ \pm \sigma_{\xi}(u(f)) \cdot \sigma_s(z(f)) \cdot \sqrt{2 \cdot \ln[\sigma_{\xi}(u(f))/\sigma_s(z(f))]} \times \\ \times \sqrt{[\sigma_{\xi}^2(u(f)) - \sigma_s^2(z(f)) + (m_{\xi}(u(f)) - m_s(z(f)))^2]}\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Полученное значение в (4) позволяет рассматривать порог G_{00} в качестве оптимального решения. На рис. 1 показаны положения порогов отображения и принятия решения. Очевидно, что выбор G_{00} как искомой величины позволит повысить достоверность обнаружения, но вместе с тем возрастет и значение ложной тревоги α . В соответствии с полученными результатами этапы двухэтапного алгоритма принятия решения можно представить следующим образом.

1. По спектральному представлению входной реализации рассчитывается порог разбиения.

2. Формируются два независимых массива: первый для спектральных компонент, превысивших порог разбиения, второй для спектральных компонент, не превысивших порог разбиения.

3. Для каждого из сформированных массивов строится распределение и в соответствии с выбранным критерием находится искомая величина порога для принятия решения об обнаружении

сигнала в обрабатываемой реализации. Для критерия максимального правдоподобия — это точка пересечения распределений массивов условных плотностей вероятности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В целях подтверждения теоретических предположений был проведен следующий эксперимент, где в качестве объекта исследований выступала ранее рассмотренная совокупность $s_0(t)$, состоящая из восьми сигналов. Затем для выбранных значений ОСШ в соответствии с разработанным методом рассчитывались значения вероятности $1 - \beta_0$ обнаружения и α_0 ложной тревоги. Для оценки полученных результатов для каждой из реализаций $x_0(t) = s_0(t) + \xi(t)$ формировались массивы априорных условных плотностей вероятности шума $u_0(f)$ и совокупности сигнала и шума

$y_0(f)$, относительно которых на основании выражений (3) и (4) вычислялись потенциально возможные значения для порога принятия решения. Затем величины потенциальных порогов принятия решения использовались для расчетов потенциальных значений вероятности $1 - \beta_0$ обнаружения и α_0 ложной тревоги. На рис. 3 представлены априорные распределения $u_0(f)$ и $y_0(f)$ и указаны значения порога разбиения, оптимизированного порога принятия решения, а также потенциально-идеального с точки зрения сформированных распределений, порога принятия решения.

Анализ представленных на рис. 3 результатов позволяет предположить, что двухэтапный алгоритм принятия решения позволит существенно повысить достоверность обнаружения при незначительном увеличении ошибок первого рода. Практические результаты, сведенные в табл. 1 и 2, подтверждают теоретические выводы об эффективности разработанного метода.

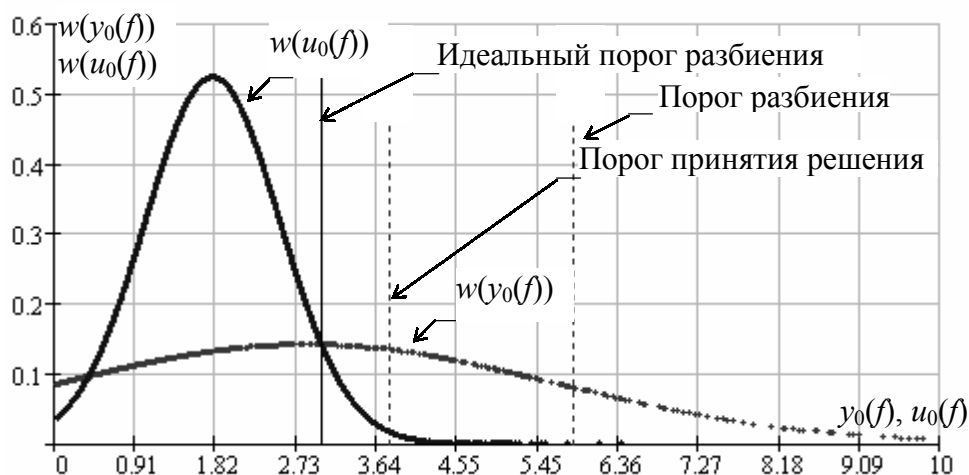


Рис. 3. Распределения спектральных компонент шума $w(u_0(f))$ и совокупности сигнала с шумом $w(y_0(f))$ при ОСШ 12 дБ

Табл. 1. Значения вероятности обнаружения для порогов разбиения и принятия решения в зависимости от ОСШ

Вид порога отображения	Значение ОСШ, дБ					
	4	6	8	10	12	14
G_p	0.27	0.32	0.41	0.67	0.72	0.74
G_{00}	0.68	0.72	0.87	0.91	0.97	0.98

Табл. 2. Значения вероятности ложной тревоги для порогов разбиения и принятия решения в зависимости от ОСШ

Вид порога отображения	Значение ОСШ, дБ					
	4	6	8	10	12	14
G_p	$2 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-7}$
G_{00}	0.11	0.097	0.092	0.089	0.084	0.08

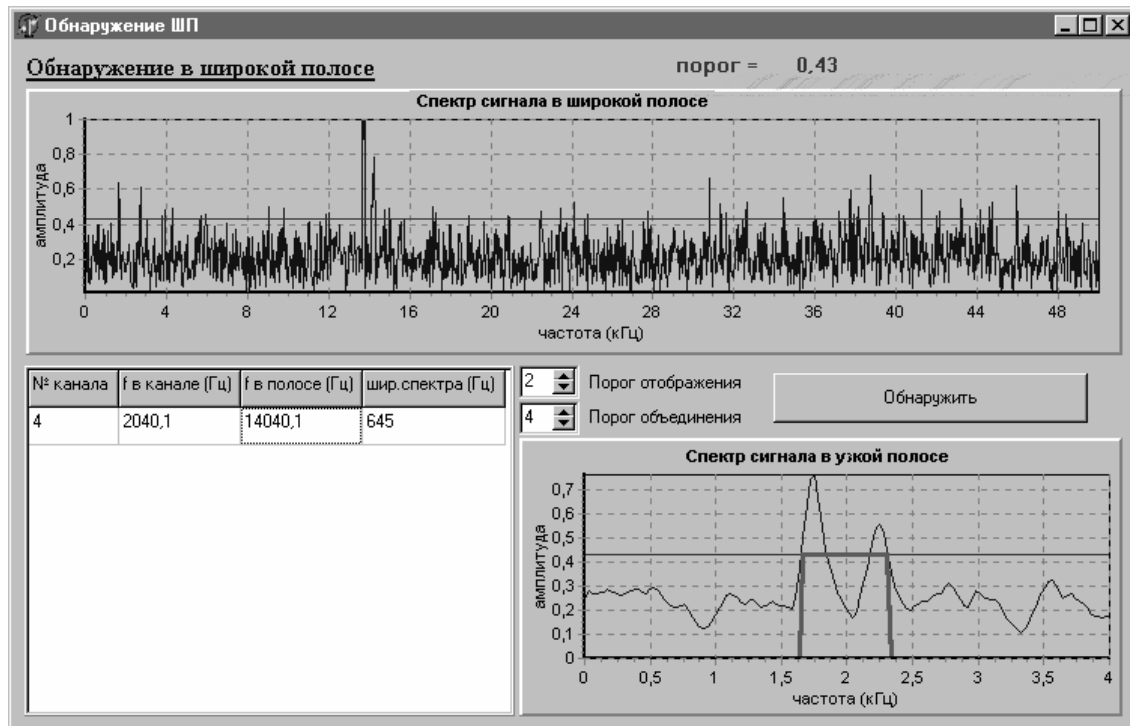


Рис. 4. Фрагмент рабочего окна программы обнаружения сигналов в широкой полосе с результатами обработки входной реализации в полосе $\Delta F = 50$ кГц, содержащей сигнал ЧМ2 на $f_0 = 14040$ кГц

Следует отметить, что для обнаружения факта наличия сигнала в полосе анализа необязательно фиксировать все его спектральные составляющие. Вполне достаточно, чтобы уровень выбранного порога превысило лишь то их количество, которое необходимо для принятия решения.

Теоретические основы разработанного метода на основе двухэтапного алгоритма принятия решения легли в основу создания программы по обнаружению радиосигналов диапазона ВЧ, фрагмент рабочего окна которой представлен на рис. 4.

В рабочий алгоритм созданной программы включены процедуры, исключающие срабатывание устройства по случайным шумовым всплескам, превысившим порог принятия решения. Особенность процедур в том, что окончательное

решение принимается только при наличии в спектре интервала длиной не менее чем из k компонент, превысивших значение G_{00} . Величину k целесообразно определять исходя из минимальной ширины спектра обнаруживаемых сигналов. Правомочность такого допущения объясняется тем, что единичный спектральный всплеск, превысивший порог, может являться шумовым, в то время как вероятность такого выброса сразу k рядом расположенных частотных компонент для шума очень мала [3].

Анализ результатов, представленных на рис. 4, показывает следующее. Несмотря на то что часть спектральных компонент обрабатываемой реализации, не являющихся сигнальными, превысила порог принятия решения (верхний график на ра-

бочем окне программы (рис. 4)), тем не менее при окончательном решении о результатах обнаружения они не учитывались как сигнальные, поскольку ширина спектра указанных компонент не превысила заданной величины k . Более того, в спектре самого сигнала (нижний график на рабочем окне программы) имеются провалы. Указанный подход позволил существенно повысить достоверность правильного распознавания при низких значениях ОСШ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный двухэтапный алгоритм расширяет возможности существующих методов обнаружения сигналов. В частности, практическое применение разработанного подхода видится в приложении к решению задач масс-спектрометрии и хроматографии. Поскольку вопрос оптимальной обработки нестационарных процессов остается открытым, дальнейшее развитие представленного метода видится в поиске эффективных путей выбора порога отображения в условиях доминирующего преобладания одного из сигналов в полосе обнаружения, а также в развитии теории обнаружения на основе частотно-временных распределений обрабатываемых реализаций. Так, в [4] предложены эффективные методы описания билинейных представлений. Полученные на их

основе модифицированные формы позволяют надеяться на продуктивность решения данного вопроса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. радио, 1968. 504 с.
2. Дворников С.В. Метод обнаружения на основе посимвольного перемножения реализаций спектра наблюдаемого процесса с автоматическим расчетом порога принятия решения // Научное приборостроение. 2004. Т. 14, № 4. С. 92–97.
3. Миддлтон Д. Введение в статистическую теорию связи / Пер. с англ., под ред. Б.Р. Левина. М.: Сов. радио, 1962. 782 с.
4. Дворников С.В., Сауков А.М. Модификация частотно-временных описаний нестационарных процессов на основе показательных и степенных функций. // Научное приборостроение. 2004. Т. 14, № 2. С. 57–66.

Военная академия связи, Санкт-Петербург

Материал поступил в редакцию 12.04.2005.

HF SIGNAL DETECTION METHOD BASED ON THE TWO-PHASE DECISION MAKING ALGORITHM

S. V. Dvornikov

Military Academy of Communication, Saint-Petersburg

A signal detection method based on the two-phase decision making algorithm is presented. One of the approaches to optimization of the decision making procedure on the basis of the minimax criterion is considered. A variant of automatic threshold selection without prior system training is proved. The results of a practical experiment are shown.