

ИНФОРМАТИКА

УДК 47.05.17

ОБНАРУЖЕНИЕ СИГНАЛОВ ВЧ-ДИАПАЗОНА ПЕРЕМНОЖЕНИЕМ СПЕКТРОВ ФРАГМЕНТОВ ИХ РЕАЛИЗАЦИЙ

*д-р техн. наук, проф. С.В. ДВОРНИКОВ**(Военная академия связи, Минск);**А.Ю. СУПЯН**(ФГУП «НИИ «Вектор», Санкт-Петербург, Россия);**д-р техн. наук, проф. В.К. ЖЕЛЕЗНЯК, К.Я. РАХАНОВ**(Полоцкий государственный университет)*

Предлагается подход к обнаружению сигналов ВЧ-диапазона на основе последовательного перемножения фрагментов реализаций их спектров. Обосновывается выбор порога принятия решения для построения автоматических обнаружителей в комплексах радиомониторинга: повышение энергетики обнаруживаемого сигнала на фоне шумов, расчет порога принятия решения, который рассчитывается исходя из параметров входной реализации, принятие решения о наличии или отсутствии сигнала в наблюдаемой выборке. Приводятся результаты практического эксперимента. Практическое применение разработанного подхода видится в приложении к решению задач повышения эффективности обнаружения в комплексах радиомониторинга, а также масс-спектрометрии, хроматографии, электронной спектрометрии и других областях приборного анализа сигналов ВЧ-диапазона. Предложенный подход позволяет по-новому подойти к анализу нестационарных процессов, причем не только в автоматах обнаружения. Он вполне применим и к билинейным распределениям, что значительно расширяет возможности технического анализа и процедур измерения частотно-временных параметров, повышает продуктивность операций распознавания. Дальнейшее развитие данного направления видится в совершенствовании на его основе процедур обнаружения шумоподобных процессов, а также оптимизации алгоритмов выбора порога отображения.

Введение. Все более широкое применение в радиомониторинге ВЧ-диапазона внедряют автоматическое обнаружение сигналов. Важнейшим параметром является отношение сигнал/шум (ОСШ), при котором обеспечивается достоверное обнаружение сигнала.

Очевидно, что повышение эффективности таких устройств напрямую зависит от чувствительности метода обнаружения, положенного в основу функционирования. Как правило, большинство методов ориентировано на статическую обработку сигналов, не позволяющую решать задачу обнаружения при достаточно низких значениях ОСШ. Однако широкое применение в современных системах связи различных режимов адаптации существенно затрудняет получение требуемого объема статистического материала. Следовательно, необходим поиск новых подходов к решению задач обнаружения в радиомониторинге, ориентированных на работу в условиях ограничения на длительность электромагнитного контакта с источниками радиоизлучения. Необходимо отметить, что аналогичные задачи приходится решать и в других научных областях, непосредственно связанных с обработкой нестационарных процессов, что подчеркивает актуальность рассматриваемой проблематики.

Постановка задачи исследования. С позиций статистической теории обработки сигналов основу задачи синтеза алгоритмов автоматического обнаружения при конечном времени наблюдения на фоне помех составляет выбор порога принятия решения. Действительно, с одной стороны, желательно не допустить пропуск сигналов, а с другой – минимизировать вероятность ложной тревоги, т.е. ложного срабатывания системы. Для радиоканалов выбор порога, обеспечивающего подобный компромисс, связан с определенными трудностями, обусловленными априорной неопределенностью характера помехового фона, а также отсутствием точных данных о параметрах обнаруживаемого излучения в мультиальтернативных системах, работающих с различными классами контрольных сигналов. Еще сложнее найти компромиссное решение при выборе порога в задачах радиомониторинга ВЧ-диапазона, ввиду особенностей распространения радиоволн и сложности учета компонент шумовых составляющих.

В теории статистической радиотехники задача обнаружения сигнала $s(t)$ на фоне помех $\xi(t)$ подразумевает определение алгоритма, обеспечивающего принятие решения о его наличии или отсутствии в наблюдаемом процессе:

$$x(t) = s(t) \oplus \xi(t),$$

где символ \oplus означает произвольное взаимодействие помехи с сигналом [1].

В этом случае процесс принятия решения представляется как совокупность операций сравнения некоторой статистической гипотезы о наличии сигнала в принятой выборке

$$H_1 : x(t) = s(t) \oplus \xi(t)$$

с ее альтернативой

$$H_0 : x(t) = \xi(t),$$

осуществляемый в соответствии с критерием, определяемым конкретными условиями.

В частности, для мультиальтернативных систем целесообразен выбор критерия максимального правдоподобия (МП) в связи со сложностью определения матрицы потерь, а следовательно, величины условного риска [2].

Для критерия МП алгоритм принятия решения состоит в выборе наибольшей из величин функции правдоподобия $\omega_0(x | H_0)$ и $\omega_1(x | H_1)$.

Практическая реализация указанного алгоритма сводится к вычислению решающей функции $\Phi(x)$, заданной на выборочном пространстве X :

$$\Phi(x) = \begin{cases} 1, & x \in X_1 \\ 0, & x \in X_0 \end{cases}, \quad (1)$$

где X_1 – область принятия гипотезы H_1 ; X_0 – область принятия гипотезы H_0 .

Согласно [1] решающая функция (1) соответствует нерандомизированному алгоритму, для которого вероятность ложной тревоги α (ошибка первого рода) рассчитывается как

$$\alpha = m_1 \{ \Phi(x | H_0) \},$$

а вероятность необнаружения β (пропуск сигнала или ошибка второго рода)

$$\beta = 1 - m_1 \{ \Phi(x | H_1) \},$$

где $m_1 \{ * \}$ – функция условных средних (статистический начальный момент первого порядка).

Решение алгоритма (1) связано с поиском компромисса между значениями α и β , поскольку снижение критической области отклонения гипотезы H_1 неизбежно ведет к увеличению допустимой области принятия гипотезы H_0 и, следовательно, ухудшению его чувствительности в отношении ошибок первого рода.

Доминирующим этапом при реализации любого критерия, в том числе и МП, является выбор порога принятия решения G , разбивающего пространство допустимых значений на непересекающиеся области X_1 и X_0 . Если для состояний s_1 – наличие и s_0 – отсутствие сигнала в принятой реализации $x(t)$, априорно известны законы их распределения:

$$w_i(x_1, \dots, x_i | s_1)$$

и

$$w_i(x_1, \dots, x_i | s_0),$$

то затруднений в расчете значения G не возникает. Однако на практике сложно обеспечить указанные условия. В частности, нестационарность шумов ВЧ-диапазона практически исключает возможность получения контрольной выборки, однозначно характеризующей фоновое излучение.

Следовательно, возникает проблема выбора эффективного значения для порога принятия решения. Таким образом, задача данной работы состоит в разработке метода, обеспечивающего автоматический расчет порога принятия решения при обнаружении сигналов с низкой энергетикой в условиях отсутствия априорных знаний о характере шумов.

Обоснование этапов метода расчета порога принятия решения для сигналов с низкой энергетикой. В [2] обоснован следующий подход для критерия МП по выбору порога разделения областей X_1 и X_0 :

$$G_0 = \frac{m_1 \{ x_1, \dots, x_n | s_1 \} + m_1 \{ x_1, \dots, x_n | s_0 \}}{2}. \quad (2)$$

В традиционных обнаружителях уровень порога, как правило, устанавливается вручную оператором исходя из априорных сведений об энергетике контрольных сигналов. Однако эффективность такого

подхода обоснована только в том случае, если спектральная мощность сигналов существенно превышала уровень шумового фона.

Указанные обстоятельства накладывают на мультиальтернативные системы дополнительные ограничения: увеличение энергопотребления или же существенное сокращение радиуса зоны обслуживания, что не всегда приемлемо.

Действительно, для реализации условия (2) необходимы достоверные сведения хотя бы об одной из выборок, однозначно характеризующих какую-либо из гипотез: H_1 или H_0 . Но в ряде случаев уровень сигнала источника тревог бывает непостоянным. Например, из-за движения источника или самого комплекса радиомониторинга, или же под воздействием различных факторов, определяемых средой распространения (канала связи).

В связи с этим первый этап предлагаемого подхода направлен на *повышение энергетики обнаруживаемого сигнала на фоне шумов*. Очевидно, что желаемый эффект может быть достигнут, например, за счет корреляционной обработки входной реализации, поэтому ее предлагается разбить на отдельные фрагменты. Длительность фрагмента должна определяться частотным разрешением, т.е. оно не должно быть хуже, чем ширина спектра самого узкополосного сигнала в полосе анализа. Тогда процедуру обнаружения первого этапа можно представить следующим образом:

$$F_i^1 \otimes F_i^2 \otimes \dots \otimes F_i^n = \prod_{n=1}^N (F_i)_n . \quad (3)$$

Здесь n – текущее значение дискретизированного фрагмента обрабатываемой входной реализации $x(t)$; N – общее число реализаций; F_i^n – преобразование Фурье от дискретизированного n -го фрагмента реализации $x(t)$.

Продуктивность решения, предложенного на первом этапе, объясняется следующим. Поскольку спектральные составляющие шумовой компоненты наблюдаемого входного потока не коррелированы друг с другом (различны от реализации к реализации), то в результате выполнения (3) номинальное значение их спектрального образа будет асимптотически с увеличением N стремиться к

$$(m_1 \{F\xi_i\})^N , \quad (4)$$

где $m_1 \{F\xi_i\}$ – медианное значение спектра входной реализации при условии $x(t) = \xi(t)$.

Если же при этом выполняется условие

$$(m_1 \{F\xi_i\}) < (m_1 \{Fs_i\}) , \quad (5)$$

где Fs_i – преобразование Фурье от $x(t) = s(t) \oplus \xi(t)$, то, начиная с некоторого значения, N будет обеспечивать однозначное выделение сигнала на фоне помех [3].

Предложенный подход позволит работать с сигналами, энергетика которых сопоставима и даже ниже уровня шумового фона, что особенно важно в решении задач обнаружения в комплексах радиомониторинга ВЧ-диапазона.

На втором этапе осуществляется *расчет порога принятия решения*. При реализации автоматов желательно, чтобы порог не задавался извне, а рассчитывался исходя из параметров входной реализации без предварительного обучения. С этой целью предлагается использовать двухэтапный подход к принятию решения, разработанный в [4]. Его особенность состоит в следующем:

- на первом этапе рассчитывается, так называемый, порог разбиения G_p , который каждую входную реализацию в спектральной области делит на области X_1 и X_0 . Считается, что значения выборки, превысившие порог разбиения, являются только сигнальными компонентами, а не превысившие его – шумовыми;

- на втором этапе из амплитудных значений каждой из областей строятся распределения $w_i(x_1, \dots, x_i | s_1)$ и $w_i(x_1, \dots, x_i | s_0)$, по результатам обработки которых рассчитывается порог принятия решения G_0 .

Например, для критерия МП он находится в соответствии с выражением (2).

Данная формула также требует уточнения, поскольку ее достоверность, как показали проведенные исследования, обеспечивается при выполнении, в общем случае, следующего условия [3]:

$$0,5 \leq \frac{p\{x_1, \dots, x_n | s_1\}}{p\{x_1, \dots, x_n | s_0\}} \leq 2 , \quad (6)$$

где $p\{*\}$ – среднее квадратичное отклонение [5].

Третий этап методики заключается в *непосредственном принятии решения о наличии или отсутствии сигнала в наблюдаемой выборке*. С целью исключения срабатывания устройства по случайным шумовым всплескам предлагается окончательное решение принимать только при наличии в спектре интервала непрерывности из компонент, превысивших значение G_0 , длиной не менее k , где величина k определяется минимальной шириной спектра обнаруживаемых сигналов. Такое допущение правомерно в силу того, 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 [6]. Необходимо отметить, что в некоторых задачах обнаружения достаточно лишь установить факт наличия излучения при недопущении ложных срабатываний. В этом случае желательно величину k задавать с некоторой избыточностью.

Основные результаты эксперимента. В целях проверки теоретических положений проводился практический эксперимент. Моделировался тракт приема с полосой пропускания $\Delta F = 10$ кГц. В качестве контрольного сигнала использовался кратковременный фрагмент радиоизлучения с эффективной шириной спектра $\Delta f_s = 80$ Гц на поднесущей частоте $f_0 = 2,5$ кГц. Значение ОСШ изменялось в пределах 0,8...0,9 дБ. В эксперименте значение ОСШ измерялось как отношение спектральной мощности сигнала к спектральной плотности шума.

Длительность входной реализации фрагмента радиосигнала составила 102,4 мс. На рисунке 1 представлен спектр входной реализации. Для удобства отображения результатов здесь и в последующем все представленные значения $A(f)$ нормированы относительно максимального значения.

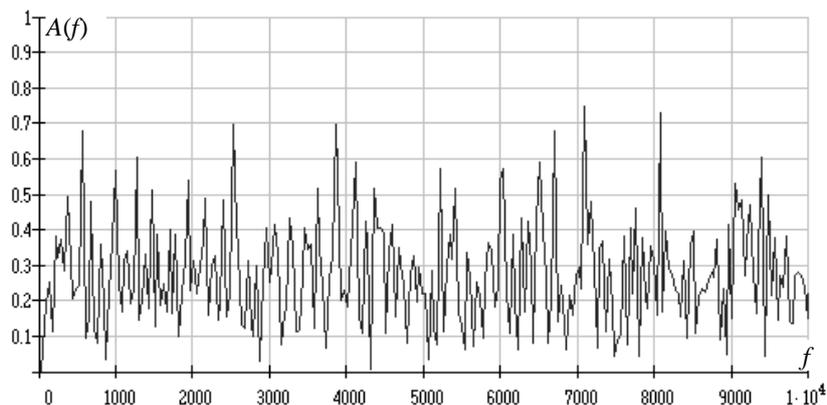


Рис. 1. Спектр первичной реализации наблюдаемого входного потока

В соответствии с разработанным подходом входная реализация была дефрагментирована на 4 части, длина каждой из которых составила 25,6 мс.

Затем согласно формуле (3) последовательно производилось перемножение спектральным образом фрагментов входной реализации. Выполнение только 3-х указанных операций обеспечило однозначное выделение сигнала на фоне помех (рис. 2).

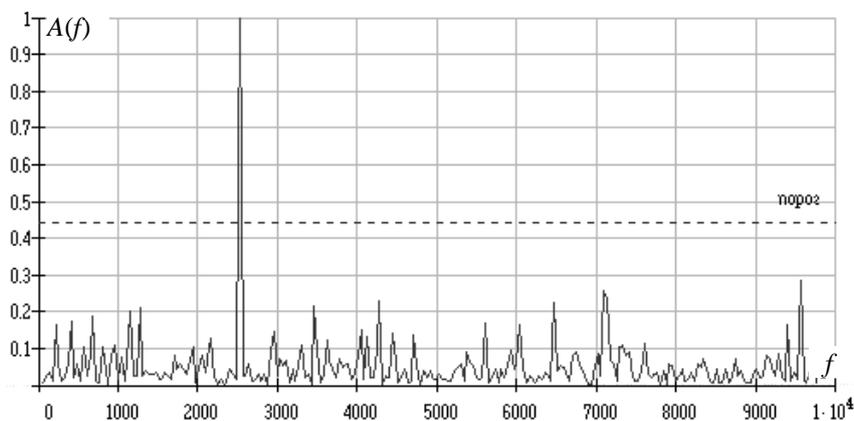


Рис. 2. Результирующий спектр после посимвольного перемножения трех реализаций наблюдаемого входного потока

Таким образом, общая длительность наблюдаемого потока, необходимая для его достоверного выделения, составила 76,8 мс, притом что даже на длительности 102,4 мс в спектре входной реализации сложно было выделить контрольное радиоизлучение.

Особый интерес представляют результаты по автоматическому расчету порога принятия решения (см. рис. 2). Поиск величин, способных выступать в качестве расчетных значений для порога отображения, проводился в соответствии с подходом, предложенным в [4]. В результате эмпирического испытания была установлена целесообразность выбора различных комбинаций значений первого начального $m_1\{*\}$ и второго центрального момента $m_2\{*\}$ от спектральных компонент входной реализации [3].

Согласно [1, 6] основным требованием, предъявляемым к порогам принятия решения, являлась максимизация вероятности правильного распознавания при минимизации ложной тревоги. Так, в таблице 1 представлены значения эмпирически отобранных комбинаций для порогов отображения при различных ОСШ (ОСШ рассчитывалось в полосе обнаружения), полученных в ходе предварительных исследований.

Таблица 1

Значения порогов отображения в зависимости от ОСШ

Вид порога отображения	Значение ОСШ, дБ					
	20	15	10	5	0	-5
«Идеальный»	506	390	305	232	195	170
G_1	525	302	226	137	112	74
G_2	782	461	356	212	186	108
G_3	772	476	380	257	222	167
G_4	515	317	254	171	148	126
G_5	7414	2216	1181	349	212	183
G_6	7150	2057	1054	263	143	117

В качестве порога разбиения были отобраны следующие расчетные величины:

$$G_1 = m_1\{x(t)\} + p\{x(t)\}, G_2 = 2 \cdot m_1\{x(t)\} + p\{x(t)\}, G_3 = 3 \cdot m_1\{x(t)\},$$

$$G_4 = 2 \cdot m_1\{x(t)\}, G_5 = m_1\{x(t)\} + m_2\{x(t)\}, G_6 = m_2\{x(t)\},$$

которые сравнивались со значением «идеального» порога, рассчитанного при условии полной априорной информации о параметрах шума и тестового сигнала (см. табл. 1).

Дополнительные условия по выбору порога определялись исходя из следующих соображений:

- принятие решения должно осуществляться только по совокупности тех реализаций, которые использовались для расчета порога отображения (в эксперименте по трем), т.е. без использования дополнительной контрольной выборки;
- устойчивая работа автомата должна быть обеспечена как при низких, так и высоких значениях ОСШ;
- выбор порога не должен зависеть от диапазона разброса амплитуды обнаруживаемых сигналов в полосе анализа;
- применимость выбранного значения порога как в мультиальтернативных, так и в моноальтернативных системах, работающих только с одним сигналом.

Совокупным требованиям в наибольшей степени соответствовало значение G_3 , которое и было выбрано в качестве порога (см. рис. 2). В таблице 2 представлена зависимость ошибок первого рода для порога отображения G_3 при различных ОСШ.

Таблица 2

Значения ошибок второго рода для G_3 в зависимости от ОСШ

Показатель	Значение ОСШ, дБ								
	22	20	18	16	14	12	10	8	6
Значение α	0,027	0,021	0,019	0,014	0,009	0,007	0,004	0,002	0,0008

Во избежание срабатывания устройств обнаружения по случайным шумовым выбросам предложено в реализационных алгоритмах на этапе принятия решения учитывать дополнительное условие – наличие не менее трех последовательно расположенных спектральных компонент превысивших порог, т.е. считать сигнал обнаруженным, если не менее $k = 3$ компонент, расположенных рядом, превысят порог.

Необходимо отметить, что значение G_3 , используемое в эксперименте, в общем случае не является оптимальным. Вполне вероятно, что для других условий и классов сигналов целесообразен выбор в качестве порога другого значения.

В частности, если ОСШ в полосе обнаружения не хуже 20 дБ, то лучшие результаты по показателю α у порога G_4 . Напротив, если ОСШ менее 1...2 дБ, то предпочтение стоит отдать G_5 и G_6 . Поэтому данный вопрос требует проведения дополнительных исследований.

Заключение. Применение разработанного подхода в первую очередь видится при решении задач обнаружения в комплексах радиомониторинга, а также масс-спектрометрии, хроматографии, электронной спектрометрии и других областях приборного анализа.

Предложенный подход позволяет по-новому подойти к анализу нестационарных процессов, причем не только в автоматах обнаружения. Он вполне применим и к билинейным распределениям, а следовательно, его приложение в этой области может значительно расширить возможности технического анализа и процедур измерения частотно-временных параметров. В частности, в совокупности с методами, представленными в [6–8], предложенный подход значительно может повысить продуктивность операций распознавания.

Дальнейшее развитие данного направления видится в совершенствовании на его основе процедур обнаружения шумоподобных процессов, а также оптимизации алгоритмов выбора порога отображения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Левин, Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б.Р. Левин. – М.: Сов. радио, 1968. – 504 с.
2. Миддлтон, Д. Введение в статистическую теорию связи / Д. Миддлтон; пер. с англ., под ред. Б.Р. Левина. – М.: Сов. радио, 1962. – 782 с.
3. Дворников, С.В. Метод обнаружения на основе посимвольного перемножения реализаций спектра наблюдаемого процесса с автоматическим расчетом порога отображения / С.В. Дворников // Научное приборостроение. – 2004. – Т. 14, № 4. – С. 92 – 97.
4. Дворников, С.В. Метод обнаружения сигналов диапазона ВЧ на основе двухэтапного алгоритма принятия решения / С.В. Дворников // Научное приборостроение. – 2005. – Т. 15, № 4. – С. 97 – 102.
5. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981. – 718 с.
6. Алексеев, А.А. Технический анализ сигналов и распознавание радиоизлучений / А.А. Алексеев, А.Б. Кириллов. – СПб.: ВАС, 1998. – 368 с.
7. Дворников, С.В. Модификация частотно-временных описаний нестационарных процессов на основе показательных и степенных функций / С.В. Дворников, А.М. Сауков // Научное приборостроение. – 2004. – Т. 14, № 2. – С. 57 – 66.
8. Железняк, В.К. Защита информации от утечки по техническим каналам: учеб. пособие / В.К. Железняк. – СПб.: ГУАП, 2006. – 188 с.

HF SIGNALS DETECTION BY MULTIPLICATION OF SPECTRA FRAGMENTS OF THEIR IMPLEMENTATION

S. DVORNIKOV, A. SUPYAN, V. ZHELEZNYAK, K. RAKHANOV

An approach to the detection signal HF on the basis of a sequential multiplication fragment of their spectra. The choice of decision threshold for the construction of automatic detectors in the complexes radiomonitoring: increasing energy detectable signal from the noise background, the calculation of the threshold of the decision, which is calculated from the parameters of the input implementation, the decision about the presence or absence of a signal in the observed sample. Provided the results of practical experiment. The application of this approach is seen in the annex to the challenges increase efficiency of detection in the complexes radio monitoring, mass spectrometry, chromatography, electron spectroscopy and other fields of instrumental analysis of signals HF. This approach allows a new approach to the analysis of nonstationary processes, not only in vending machines found. It is fully applicable to bilinear distributions that significantly expands the possibilities of technical analysis and the measurement of frequency-time parameters, increases productivity operations recognition. Further development of this direction is seen to improve its procedures based on the detection of noise-like processes, and optimization algorithms for selecting the threshold mapping.