

Формирование признаков и распознавание сигналов на основе обработки их фреймовых преобразований

Formation of features and signal identification on the basis of processing their frame-based transformations

Ключевые слова: фреймовые вейвлет-преобразования – frame wavelet transformations; критерий принятия решения – decision-making criterion; оценка эффективности – assessment of efficiency.

Рассматривается метод формирования первичных признаков пространств для радиосигналов на основе обработки их фреймовых вейвлет-преобразований. Предлагаются сравнительные результаты разработанного подхода и способа, базирующегося на коэффициентах непрерывного вейвлет-преобразования. Обосновываются различные варианты выбора критерия принятия решения при распознавании. Представляются фрагменты эксперимента по оценке эффективности.

The article analyzes the method of forming primary attribute spaces for radio signals on the basis of processing their frame-based wavelet transformations. It proposes comparative results of the developed approach and the way, which is based on factors of continuous wavelet transformation. The article settles different versions for choosing criterion for making decision during the process of identification. It demonstrates fragments of the experiment dealing with estimation of efficiency.

Проблемы построения систем автоматического распознавания в комплексах радиомониторинга обусловлены недостаточным быстродействием традиционных методов формирования признаков. Это связано с тем, что, как правило, основным требованием к подобным устройствам являлось обеспечение установленного уровня достоверности распознавания, который достигался за счет статистической обработки полученных результатов и увеличения размерности признакового пространства. Следовательно, необходим поиск

ДВОРНИКОВ / DVORNIKOV S. Сергей Викторович

кандидат технических наук,
доцент, заместитель начальника
кафедры Военной академии связи им. С.М. Буденного,
Санкт-Петербург

БАЛУНИН / BALUNIN E. Евгений Иванович

кандидат технических наук,
старший преподаватель
Череповецкого военного инженерного
института радиоэлектроники,
Череповец

ЯХЕЕВ / YANEV A. Андрей Фаридович

доцент, заместитель начальника факультета
Череповецкого военного инженерного
института радиоэлектроники,
Череповец

ДВОРНИКОВ / DVORNIKOV A. Александр Сергеевич

курсант Череповецкого
военного инженерного
института радиоэлектроники,
Череповец

эффективных подходов к распознаванию для применения их в комплексах радиомониторинга.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Существующие подходы к формированию признаков распознавания в общем случае делятся на две группы. К первой относятся статистические методы, в том числе – базирующиеся на обработке результатов оценивания основных параметров сигнала, а ко второй – методы, основанные на разложении входной реализации по некоторой системе ортогональных функций.

Традиционно в системах радиомониторинга широко используются методы первой группы. Однако они, как правило, ориентированы на



Рис. 1. Обобщенная структурная схема процесса распознавания

работу с ограниченным числом классов сигналов и требуют значительного объема статистических данных, хотя и позволяют решать задачи распознавания с достаточно высокой достоверностью. В реальных условиях в системах радиомониторинга при наличии временных ограничений на длительность процесса распознавания и с учетом отсутствия априорной информации о количестве и видах распознаваемых классов сигналов реализация таких методов формирования признаков связана со значительными сложностями.

Необходимо отметить, что методы, относящиеся ко второй группе, позволяют синтезировать более обобщенные алгоритмы и, таким образом, могут обеспечить распознавание большого числа сигналов различных классов на основе единого унифицированного подхода к формированию признаков. Данные методы, в принципе, не являются жестко ориентированными на конкретные виды сигналов и не требуют дополнительной модификации процедур обработки при внесении изменений в перечень распознаваемых классов. Однако качество распознавания в этих методах во многом определяется выбором базисных функций. Наоборот, методы первой группы изначально используют признаки, являющиеся контрастными только для сигналов определенных классов, их применение целесообразно, скорее, для автоматизации процедур технического анализа сигналов.

В [1, 2] предложены методы формирования признаков пространств, основанные на разложении входной реализации по некоторой системе ортогональных функций. Однако в силу ряда особенностей используемых базисных функций они не позволяют достичь требуемой контрастности классов, а следовательно — достоверности распознавания в условиях воздействия шумов и помех. Целью настоящей работы является разра-

ботка метода формирования признаков и распознавания радиосигналов, позволяющего обеспечить требуемую достоверность и при этом существенно снизить его вычислительную сложность по сравнению с уже известными подходами.

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ПРИЗНАКОВ

В [3] предложен способ формирования признаков и распознавания на основе непрерывного вейвлет-преобразования (НВП). Рассмотрим основные этапы его реализации.

1. Формирование матрицы НВП из дискретных квантованных выборок эталонных сигналов.
2. Формирование из матриц векторов вейвлет-коэффициентов.
3. Формирование общей ковариационной матрицы из векторов эталонных сигналов.
4. Спектральное разложение матриц эталонных сигналов.
5. Формирование усеченной матрицы собственных векторов путем выбора собственных векторов общей ковариационной матрицы, соответствующих ее максимальным собственным значениям.
6. Формирование параметров эталонных сигналов путем умножения усеченной матрицы собственных векторов на векторы РЭ эталонных сигналов. В качестве параметров эталонов используются средние значения полученных произведений.

Анализ представленных этапов формирования векторов признаков показывает на необходимость выполнения значительного объема вычислительных операций, обусловленных необходимостью выполнения процедур НВП, выполнения спектрального разложения матриц РЭ и формирования усеченной матрицы собственных векторов.

Разрешение противоречий указанного метода возможно за счет устранения избыточности исходного описания сигналов при переходе к более

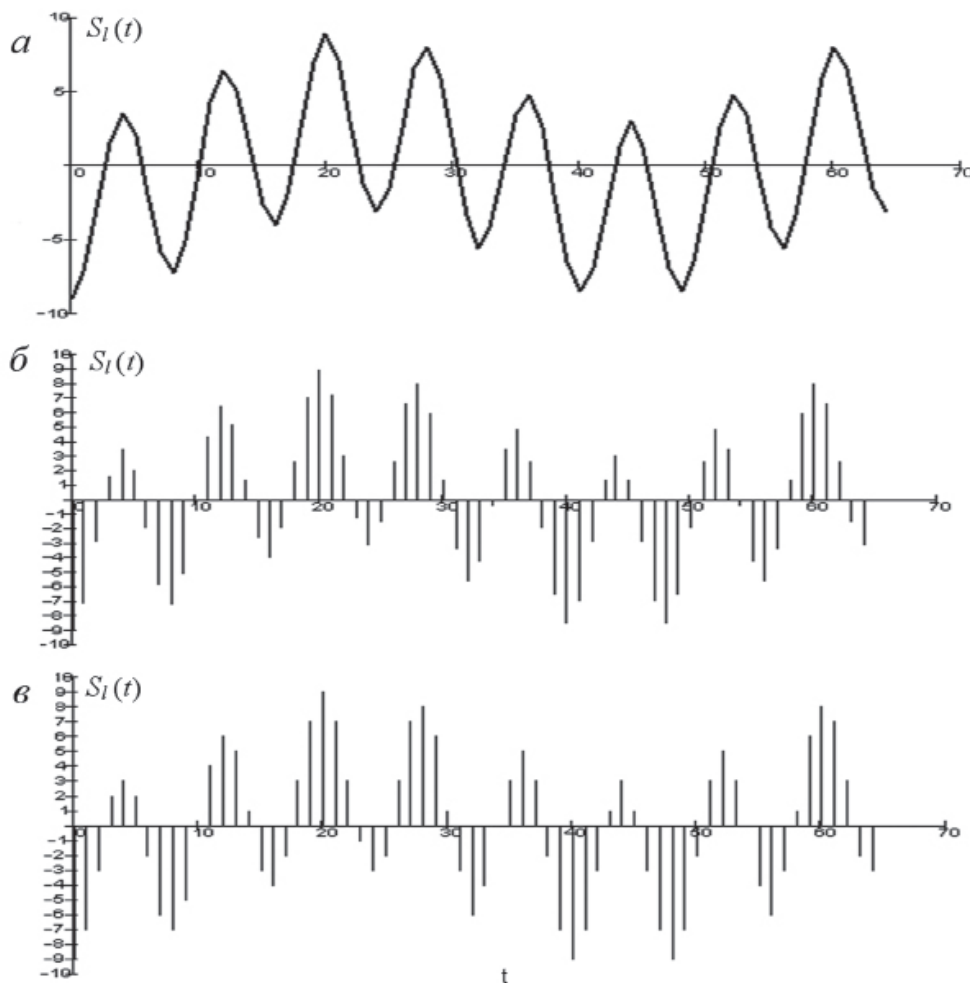


Рис. 2. Представление обрабатываемого сигнала: а – аналоговое; б – дискретизированное по времени; в – дискретизированное по времени и квантованное по напряжению

компактным формам, а также за счет использования в качестве векторов признаков самих вейвлет-коэффициентов, упорядоченных определенным образом. Очевидно, в этом случае сам процесс распознавания потребует включения в него новых процедур, что повлечет изменение его структурной схемы, которую теперь можно представить в виде, показанном на рис. 1.

В общем случае модифицированный процесс распознавания в соответствии со структурной схемой (см. рис. 1) будет включать в себя выполнение следующих процедур:

- формирование матриц РЭ $\{\mathbf{M}_1 \dots \mathbf{M}_L\}$ для множества $\{S(t)_1 \dots S(t)_L\}$ эталонных сигналов;
- формирование на основе матриц РЭ $\{\mathbf{M}_1 \dots \mathbf{M}_L\}$ векторов признаков $\{\vec{m}_1 \dots \vec{m}_L\}$;
- формирование матрицы РЭ \mathbf{M} распознаваемого сигнала;
- формирование на основе матрицы РЭ $\widehat{\mathbf{M}}$ вектора признаков $\widehat{\vec{m}}$;

– сравнение вектора признаков распознаваемого радиосигнала с векторами признаков эталонных радиосигналов $|\widehat{\vec{m}} - \{\vec{m}_1 \dots \vec{m}_L\}|$;

– принятие решения о принадлежности распознаваемого радиосигнала к одному из L эталонных радиосигналов $|\widehat{\vec{m}} - \{\vec{m}_1 \dots \vec{m}_L\}^{\min}|$.

Таким образом, за счет снижения количества вычислительных процедур модифицированный метод позволит повысить быстродействие процесса распознавания и тем самым разрешить противоречие, обусловленное необходимостью высокой оперативности решения задачи распознавания при возрастающем объеме классов, распознаваемых сигналов.

Рассмотрим возможность реализации предложенного метода. Предварительно зададим L эталонных сигналов, число и типы которых определяются условиями и требованиями по распознаванию. Затем каждый из l эталонных сигналов,

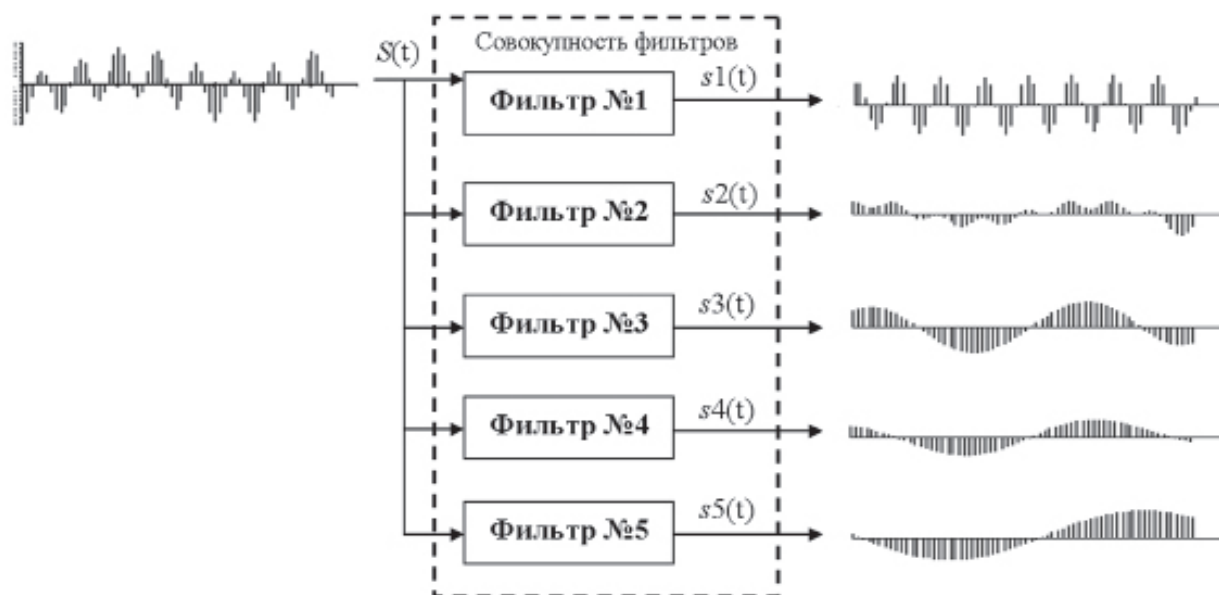


Рис. 3. Принцип вычисления матрицы РЭ сигнала на основе ФВП

где $l = 1, \dots, L$, дискретизируют и квантуют (рис. 2).

Следует отметить, что квантованные выборки эталонных последовательностей сигналов формируют в соответствии с требованиями вычисления статистических оценок, т.е. длина выборки N (значение дискретных отчетов сигналов $n = 1, \dots, N$) выбирается в пределах 256–16384, в зависимости от требований по вероятности правильного распознавания и времени обработки (длина выборки должна быть кратна значению 2^i , где i – целое число) [4]. Чем больше N , тем выше вероятность правильного распознавания, однако при этом время обработки возрастает.

После этого формируется совокупность матриц РЭ $\{\mathbf{M}_1 \dots \mathbf{M}_L\}$, для чего над квантованными выборками эталонных сигналов выполняют операцию фреймового вейвлет-преобразования (ФВП). Суть операции ФВП заключается в фильтрации выборок квантованного радиосигнала с помощью совокупности из $K \geq 2$ фильтров (рис. 3). Общее число K фильтров системы формирования вейвлет-коэффициентов определяют с учетом следующего условия:

$$\Delta F = \sum_{k=1}^K 2^{k-1} \Delta \Phi_1 + \Delta \Phi_1, \quad (1)$$

где ΔF – ширина спектра радиосигнала; $\Delta \Phi_1$ – ширина полосы пропускания первого фильтра [4].

В свою очередь, ширину полосы пропускания $\Delta \Phi_k$ k -го фильтра, где $k = 1, \dots, K$, выбирают из следующего условия:

$$\Delta \Phi_k = 2^{(k-1)} \Delta \Phi_1. \quad (2)$$

Такой выбор полос пропускания фильтров обеспечивает полное перекрытие по частоте спектра радиосигнала системой вейвлет-фильтров, при этом удается избежать избыточности описания, свойственной НВП [4]. Совокупность вейвлет-коэффициентов на выходе каждого k -го фильтра нормируют путем деления их на коэффициент, имеющий наибольшее значение (см. рис. 3), а затем ранжируют по убыванию.

Учитывая потактовую фильтрацию входной реализации, общее число формируемых вейвлет-коэффициентов в общем случае может быть достаточно большим. В то же время, вейвлет-коэффициенты в совокупности представляют признаки распознавания, используемые в дальнейшем для формирования образов, поэтому в целях повышения быстродействия реализации процедур распознавания предлагается исключать малозначимые вейвлет-коэффициенты из рассмотрения. В частности, в [5] показано, что они не оказывают существенного влияния на контрастность формируемых образов.

Анализ результатов эксперимента [5] показал, что каждая из совокупностей вейвлет-коэффициентов на выходе k -го фильтра содержит малозначимые коэффициенты, которые без ущерба для точности определения признаков радиосигнала могут быть исключены из дальнейшего рассмотрения (рис. 4). Это, в свою очередь, существенно уменьшит

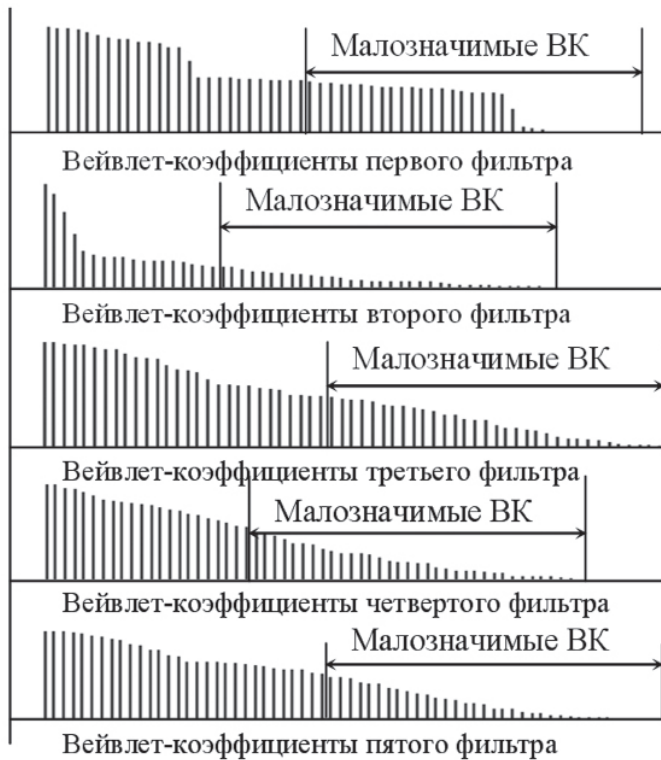


Рис. 4. Модули вейвлет-коэффициентов, образующих матрицу РЭ на выходе фильтров, выполняющих операцию ФВП

дальнейший объем вычислительных операций, т.е. снизит время, необходимое для распознавания радиосигнала, и тем самым повысит оперативность распознавания.

К малозначимым вейвлет-коэффициентам в [5] предложено относить такие коэффициенты, суммарная энергия которых составляет 10–30 % от общей энергии всей совокупности на выходе k -го фильтра. Конкретное значение неучитываемых признаков зависит от вида сигнала, требуемой вероятности распознавания и времени, отводимого на распознавание.

На следующем этапе из полученной «усеченной» совокупности вейвлет-коэффициентов формируются матрицы РЭ \mathbf{M}_l для каждого l -го эталонного сигнала (рис. 5). Причем строками матрицы РЭ \mathbf{M}_l l -го эталонного сигнала являются коэффициенты, полученные в каждой полосе частот $\Delta\Phi_k$ на выходе соответствующего k -го фильтра. В матрице РЭ вместо малозначимых вейвлет-коэффициентов вписываются нулевые значения.

Выбор алгоритма фреймового преобразования для формирования признаков в разрабатываемом методе распознавания объясняется тем, что по своей сути непрерывное вейвлет-преобразование является избыточным описанием, причем его избы-

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \dots & m_{1n} & m_{1n+1}=0 & \dots & m_{1N}=0 \\ m_{21} & m_{22} & \dots & m_{2n} & m_{2n+1}=0 & \dots & m_{2N}=0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{k1} & m_{k2} & \dots & m_{kn} & m_{kn+1}=0 & \dots & m_{kN}=0 \end{bmatrix}$$

Рис. 5. Матрица РЭ, сформированная на основе ФВП

точность не оказывает существенного влияния на вероятность правильного распознавания радиосигналов [4]. Следовательно, использование фреймового подхода позволит сократить количество вычислительных операций и тем самым повысить оперативность операций распознавания.

Следует заметить, что если для получения матрицы РЭ на основе НВП фрагмента радиосигнала длительностью 64 дискретных отчета (рис. 6) потребуется система, состоящая из 64 фильтров, то для получения матрицы РЭ на основе ФВП того же фрагмента потребуется система, состоящая всего из 5 фильтров (см. рис. 3).

В качестве примера адекватности применения фреймового подхода вместо непрерывного для решения рассматриваемых задач на рис. 7 представлен фрагмент указанных представлений тестового сигнала длительностью 64 отчета. Детальное рассмотрение фрагментов матрицы НВП, полученного с выходов 16–32-го фильтров системы, и матрицы ФВП с выхода 4-го фильтра соответствующей системы фильтров указывает на их практическую идентичность (рис. 8). Таким образом, избыточность НВП ведет к увеличению расчетных процедур, однако не дает дополнительной информации, существенной для процесса распознавания.

На практике процедуры выполнения операции ФВП и НВП можно реализовать посредством банка фильтров, амплитудно-частотные характеристики которых соответствуют полосам пропускания базисных вейвлет-функций. В этом случае размерность матрицы РЭ \mathbf{M} равна $(K \times N)$, где K – число фильтров, N – число дискретных отчетов сигнала.

Формирование вектора признаков l -го эталонного сигнала \vec{m}_l можно реализовать путем построчной конкатенации всех вейвлет-коэффициентов \mathbf{M}_l -й матрицы РЭ с учетом наличия позиций нулевых элементов. Для матрицы РЭ \mathbf{M}_l общая длина вектора признаков \vec{m}_l равна $(K \times N)$. В результате выполнения указанных операций для множества $\{S(t)_1 \dots S(t)_L\}$ получаем совокупность признаков $\{\vec{m}_1 \dots \vec{m}_L\}$ эталонных радиосигналов. На рисунке 9 представлены векторы признаков совокупности

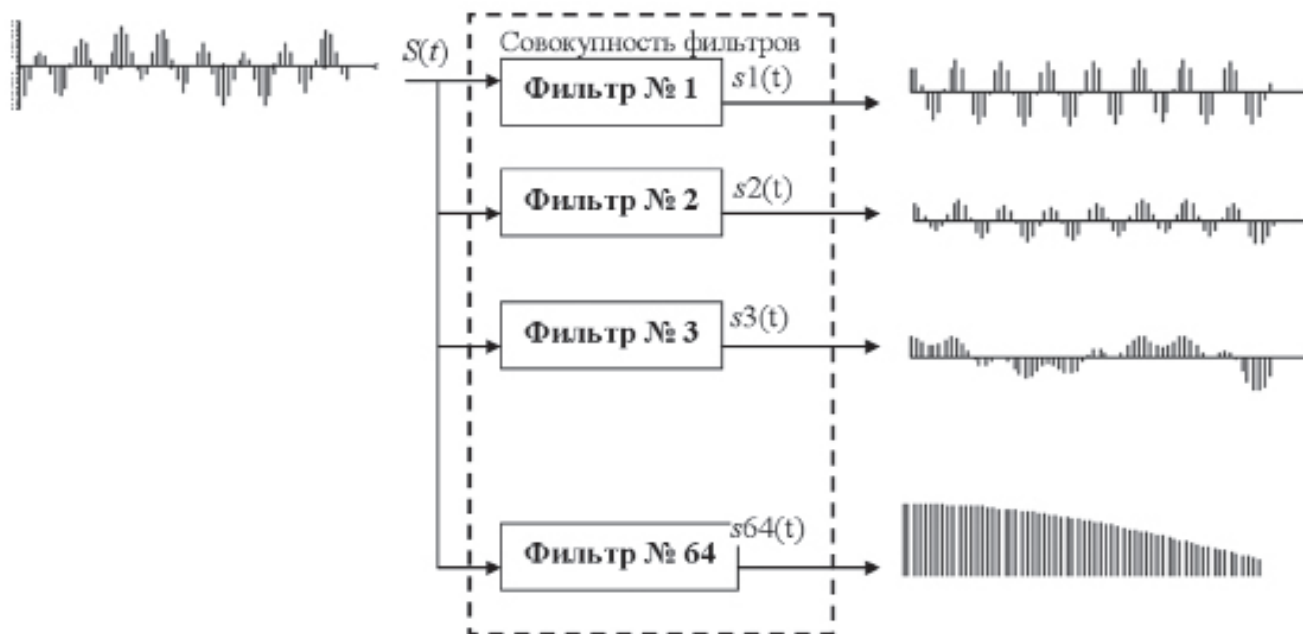


Рис. 6. Принцип вычисления матрицы РЭ радиосигнала на основе НВП

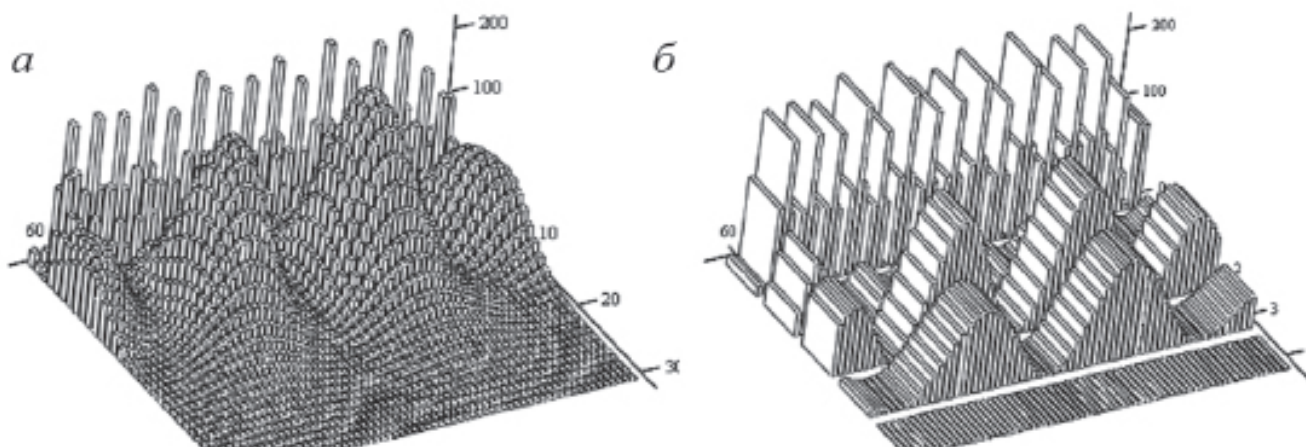


Рис. 7. Трехмерная матрица модуля РЭ фрагмента сигнала длительностью 64 дискретных отчета: а – на основе НВП; б – на основе ФВП

эталонных сигналов. Затем над распознаваемым сигналом $\hat{S}(t)$ выполняют операции для формирования вектора признаков, аналогичные эталонным сигналам.

ВЫБОР КРИТЕРИЯ РАСПОЗНАВАНИЯ

Процесс идентификации может быть реализован с использованием различных приемов. Например, путем вычитания по модулю из вектора признаков принятого радиосигнала векторов признаков каждого из L эталонных радиосигналов $\{\vec{m}_1, \dots, \vec{m}_L\}$. В частности, распо-

знаваемый сигнал считают инцидентным одному из L эталонных сигналов с использованием одного из решающих правил (например – когда разница между векторами признаков минимальна).

Другой подход к распознаванию предложен в [6]. В нем для разделимости классов при количественной оценке контрастности сформированных признаков выбран следующий показатель:

$$D_l = \frac{\langle \vec{m}, \vec{m}_l \rangle}{\|\vec{m}\| \cdot \|\vec{m}_l\|} = \frac{\sum_{r=1}^R \vec{m}^r \cdot \vec{m}_l^r}{\sqrt{\sum_{r=1}^R (\vec{m}^r)^2} \sqrt{\sum_{r=1}^R (\vec{m}_l^r)^2}}, \quad (2)$$

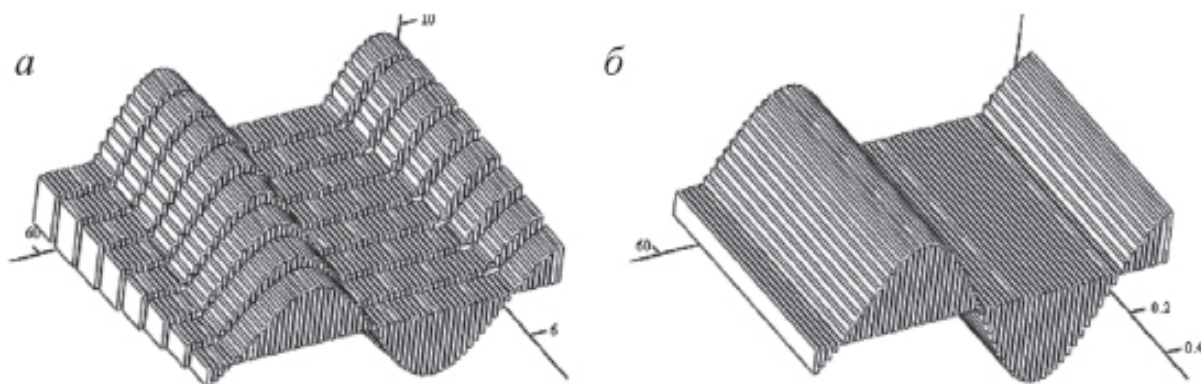


Рис. 8. Трехмерный фрагмент матрица модуля РЭ: а – с выхода 16–32-го фильтров для НВП; б – с выхода 5-го фильтра для ФВП

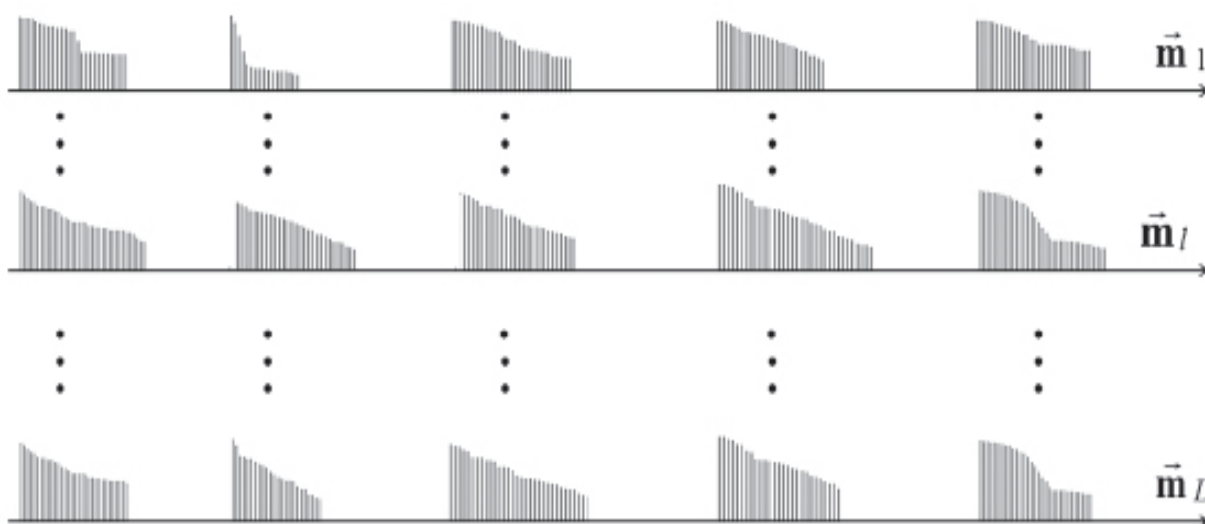


Рис. 9. Совокупность векторов признаков эталонных радиосигналов

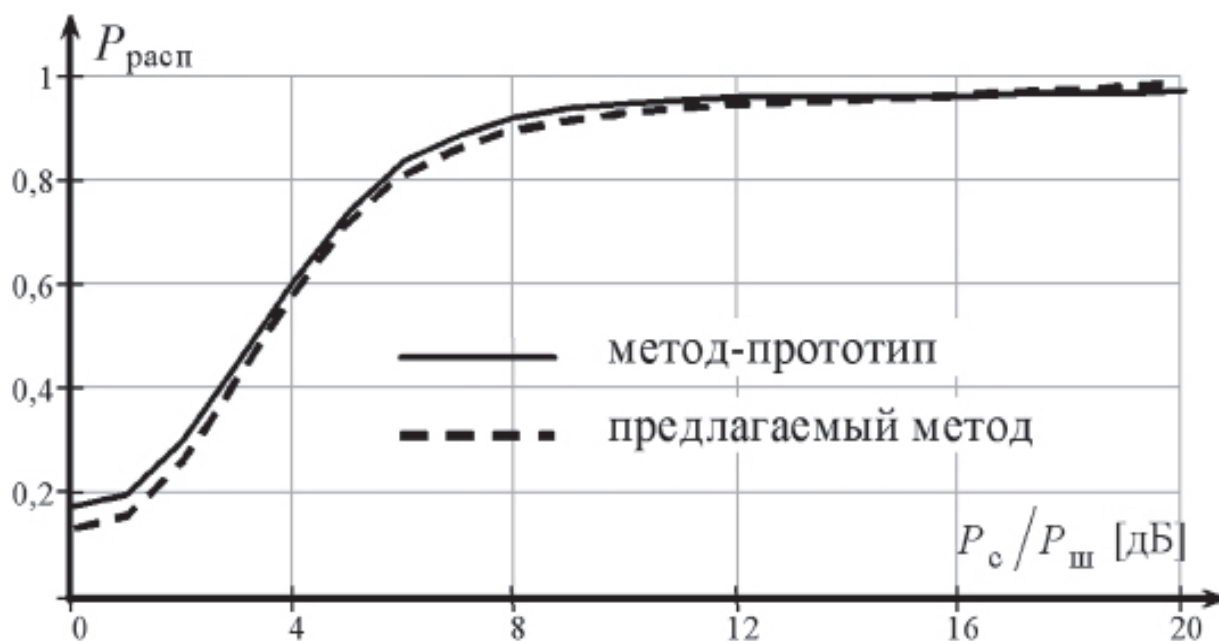


Рис. 10. Результаты распознавания тестовых сигналов различными методами

где R – количество вейвлет-коэффициентов в векторе, учитываемых в качестве признаков.

С учетом (2) окончательное решение о принадлежности сигнала к тому или иному распознаваемому классу будет приниматься по результатам поиска максимального значения $\{D_l\}_L$, где L – количество эталонных описаний. Для исключения ложного срабатывания системы распознавания в автоматическом режиме предложено установить порог принятия решения:

$$\Delta_l = (1 - D_l) \cdot 100\%. \quad (3)$$

Результаты практического эксперимента в [7] показали целесообразность выбора $\Delta_l = 1-5\%$. Эффективность разработанного метода, использующего в качестве признакового пространства коэффициенты матриц ФВП, оценивалась в сравнении с методом на основе НВП. Показателем эффективности была определена вероятность правильного распознавания $P_{\text{расп}}$.

Для эксперимента в качестве распознаваемых использовались 7 моделей сигналов амплитудной, частотной и фазовой телеграфии, с различными скоростями передачи (АТ 50 Бод – радиосигнал амплитудной телеграфии со скоростью передачи 50 Бод; ЧМн2 800 Гц – 500 Бод, ЧМн2 800 Гц – 200 Бод, ЧМн2 600 Гц – 100 Бод, ЧМн2 200 Гц – 100 Бод – радиосигналы частотной телеграфии с разносом 800, 600, 200 Гц и скоростью передачи 500, 200, 100 Бод; ФМн2 500 Бод, ФМн2 1200 Бод – радиосигналы фазовой телеграфии со скоростью передачи 500 и 1200 Бод, соответственно).

Все сигналы нормировались относительно уровня их средней мощности. Формирование параметров эталонов проводили по 100 выборкам каждого сигнала. Вероятность $P_{\text{расп}}$ правильного распознавания оценивалась методом Монте-Карло по 100 выборкам для каждого сигнала при различных отношениях мощности сигнала P_c и мощности шума $P_{\text{ш}}$ в диапазоне $P_c/P_{\text{ш}}$ от 0 до 20 дБ (рис. 10).

Результаты сравнительных расчетов показали, что вероятность правильного распознавания радиосигналов $P_{\text{расп}}$ для сравниваемых методов сопоставима при практически двукратном снижении времени распознавания, обусловленном значительным снижением числа вычислительных процедур, что указывает на возможность повышения оперативности распознавания в комплексах радиомониторинга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют говорить о решении поставленной задачи. Разработанный

подход вполне может быть использован при распознавании сигналов в комплексах радиомониторинга. Он позволяет достаточно легко расширить число распознаваемых классов только за счет увеличения базы эталонных описаний, без внесения изменений в сам алгоритм.

Учитывая, что при формировании пространства признаков необходимо учитывать частотно-временную структуру сигналов, рекомендуется использовать матрицы их ФВП. Это позволит улучшить качество формируемых признаков и повысить быстродействие их реализации. Для учета при распознавании информационной составляющей радиосигналов предлагается формировать несколько образов по каждому из эталонных классов, а решение о принадлежности принимать по правилу одного или нескольких ближайших соседей. В качестве одного из направлений дальнейших исследований может выступать совершенствование критериев принятия решения в алгоритмах распознавания.

Литература

1. Омельченко В.А., Матевицкий Е.О. и др. Распознавание случайных сигналов по спектру // Изв. вузов. – Радиоэлектроника. – 1979. – Т. XXII. – № 12. – С. 16–22.
2. Marinovic N., Eichmann G. An expansion of Wigner distribution and its applications // Proc. IEEE ICASSP. – 1985. – P. 1021–1024.
3. Дворников С.В., Сауков А.М., Симонов А.Н. и др. Патент «Способ распознавания радиосигналов» РФ № 2261476 МПК7 G 06 K 9/00 от 27 сентября 2005 года.
4. Дьяконов В.П. Вейвлеты: От теории к практике. – М.: СОЛОН-Р, 2002.
5. Дворников С.В., Дворников А.С., Сауков А.М. и др. Положительное решение на патент РФ «Способ распознавания радиосигналов» РФ № 2007115510/09 (016842) 01 2 ДОМ 09.09.2008 091701 от 24 апреля 2007 года.
6. Дворников С.В., Желнин С.Р., Медведев М.Е. Метод формирования признаков распознавания сигналов диапазона дециметровых волн по их вейвлет-коэффициентам, рассчитанным на основе лифтинговой схемы // Информация и космос. – 2006. – № 2. – С. 68–74.
7. Дворников С.В., Сауков А.М. Метод распознавания радиосигналов на основе вейвлет-пакетов // Научное приборостроение. – 2004. – Т. 14. – № 4. – С. 85–93.