

УДК 621.391

© С. В. Дворников, А. М. Сауков

МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-ПАКЕТОВ

Предлагается метод формирования признаков распознавания сигналов на основе обработки их вейвлет-коэффициентов, рассчитанных в результате применения вейвлет-пакетов. Приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований, подтверждающие контрастность сформированных признаков пространств. Эффект достигается за счет применения более сложных процедур обработки сигналов, которые используют технику масштабно-временного анализа.

ВВЕДЕНИЕ

Традиционно практический интерес для распознавания радиосигналов представляют те методы, которые при заданных условиях обеспечивают требуемый уровень достоверности классификации. До недавнего времени доминирующим являлся подход к построению устройств распознавания, при котором не накладывались ограничения на длительность обрабатываемой реализации сигнала, т. к. требуемая достоверность распознавания достигалась за счет статистической обработки полученных результатов, а также увеличения размерности признакового пространства. Однако при распознавании кратковременных сигналов современных систем радиосвязи сложно обеспечить указанные условия. Дополнительным требованием зачастую является необходимость принятия решения в условиях дефицита времени. Здесь необходим переход к другим методам, обеспечивающим требуемую контрастность радиосигналов в формируемых признаковых пространствах согласно сформулированным условиям.

В данной работе рассматривается возможность применения к решению данной задачи теории масштабно-временного анализа.

ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАСПОЗНАВАНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ

В общем случае распознавание представляет процесс отнесения исследуемого объекта, в данном случае радиосигнала, представленного совокупностью наблюдений, к одному из альтернативных классов [1]. Процесс соотношения объекта к классу базируется на существующих различиях некоторой упорядоченной совокупности признаков распознавания. Традиционно указанные признаки формируют на основе таких параметров радиосигналов, как длительность элементов модули-

рующей функции, число экстремумов огибающей сигнала, статистические характеристики количества переходов нулевого уровня, моменты высших порядков формы спектра, полученных в результате наблюдений [2]. Затем совокупность наблюдений представляется в виде матрицы

$$X_{pn} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1i} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2i} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{p1} & x_{p2} & \dots & x_{pi} & \dots & x_{pn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где n — количество наблюдений, используемых для распознавания, а каждый столбец $X_i = (x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{pi})^T$, $i = 1, 2, \dots, n$ матрицы X_{pn} есть p -мерный вектор наблюдаемых значений p признаков $X_1, X_2, \dots, X_p$, отражающих наиболее важные для распознавания свойства объектов. Набор признаков p , как правило, является одинаковым для всех распознаваемых классов $S_1, S_2, \dots, S_k$.

Таким образом, рассматривается задача распознавания принадлежности наблюдаемого объекта к одному из конечного фиксированного числа классов $S_1, S_2, \dots, S_k$, описываемых одинаковым для всех классов набором признаков $X_1, X_2, \dots, X_p$. Различия между классами будут проявляться только в различии характеристик признаков у разных объектов. Тогда для любого набора признаков $X_1, X_2, \dots, X_p$ можно задать правила, согласно которым любым двум классам s_1 и s_r ставится в соответствие вектор

$$D_{1r} = \begin{bmatrix} d_{1r}^{1r} \\ \vdots \\ d_{1r}^{1q} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

состоящий из q скаляров, называемых межклассовыми расстояниями и выражающих степень отличия у этих классов характеристик данных признаков.

Неотъемлемой частью процесса распознавания является определение набора признаков $X_1, X_2, \dots, X_p$, т. е. формирование признакового пространства таким образом, чтобы при минимально возможной размерности p обеспечить требуемую достоверность классификации. В соответствии с рассмотренным подходом к решению задачи распознавания важным моментом является выбор метода формирования признакового пространства. Применение для этих целей подходов, базирующихся на традиционном спектрально-временном анализе Фурье, связано с определенными трудностями. Во-первых, высокие требования к входному потоку по отношению сигнал/шум (ОСШ). Во-вторых, недостаточная достоверность классификации для многокомпонентных и низкостационарных сигналов и, в-третьих, необходимость значительного объема реализаций. Стремление преодолеть указанные ограничения в рамках традиционных подходов классической спектральной обработки сигналов приводит к сложным в реализационном плане вариантам устройств распознавания сигналов и излучений, что является неприемлемым для рассматриваемых условий [2].

Таким образом, сформулируем задачу исследования: разработать метод, позволяющий формировать контрастные признаковые пространства для автоматического распознавания сигналов ОВЧ-, ВЧ-диапазонов в условиях ограничений на длительность обрабатываемой реализации при ОСШ менее 10 дБ в условиях частичной или полной априорной неопределенности об их структуре.

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ПАКЕТОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРВИЧНЫХ ПРИЗНАКОВЫХ ПРОСТРАНСТВ

В настоящее время широкое применение находят методы обработки и анализа радиосигналов на основе их вейвлет-преобразований. Сущность указанных преобразований состоит в разложении исходного сигнала по системе базисных вейвлетов — функций, каждая из которых является сдвинутой и масштабированной копией исходной (порождающего, или материнского вейвлета) [2, 4]. Характерным свойством вейвлет-функций (в дальнейшем вейвлет) является конечность энергии при их полной локализации как в частотной, так и во временной областях.

Таким образом, любую последовательность дискретных отсчетов радиосигнала $S(t_i)$ можно представить в виде упорядоченной совокупности

коэффициентов разложения по системе масштабирующих функций и вейвлет-функций:

$$S(t_i) = \sum_{k=1}^{2^{N-M}} a_{m,k} \varphi_{m,k}(t_i) + \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{2^{N-m}} d_{m,k} \psi_{m,k}(t_i),$$

где M — число уровней разложения; $a_{m,k}$ и $d_{m,k}$ — коэффициенты разложения.

Масштабирующие и вейвлет-функции определяются в соответствии с теорией кратномасштабного анализа (КМА) [5]:

$$\varphi_{m,k}(t) = \sqrt{2^m} \varphi(2^m t - k), \quad (3)$$

$$\psi_{m,k}(t) = \sqrt{2^m} \psi(2^m t - k). \quad (4)$$

Здесь в (3) и (4) $\sqrt{2^m}$ — нормирующий множитель; а $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$; $m \in \mathbb{Z}$.

На практике для быстрого расчета значений коэффициентов $a_{m,k}$ и $d_{m,k}$ применяют схему последовательного деления, называемую пирамидой или алгоритмом Маллата [6, 7], которая интерпретируется как последовательная двухполосная фильтрация входного сигнала при помощи каскадно-соединенных блоков фильтров низкой (Н) и высокой (G) частот (рис. 1).

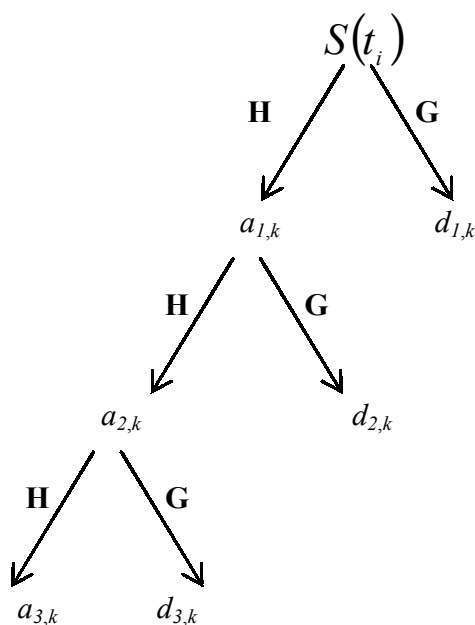


Рис. 1. Схема декомпозиции сигнальной последовательности согласно алгоритму Маллата

На рис. 1 для вейвлет-коэффициентов $a_{m,k}$ и $d_{m,k}$ первый индекс m соответствует номеру уровня разложения, а второй индекс $k = 0, 1, \dots, 2^m - 1$ — порядковому значению вейвлет-коэффициента на уровне разложения m . Согласно теории КМА, значения $a_{m,k}$ и $d_{m,k}$ можно получить, базируясь на коэффициентах, рассчитанных на предыдущих этапах декомпозиции сигнала:

$$a_{m,k} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_n a_{m-1,n} h_{n+2k},$$

$$d_{m,k} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_n a_{m-1,n} g_{n+2k},$$

где h_m и g_m — последовательности, определяющие характеристики фильтров H и G на m -ом уровне разложения.

В развитие теории КМА Р. Койфманом и М. Викирхаузером предложено усовершенствовать алгоритм Маллата за счет дополнительной обработки высокочастотных составляющих пирамиды анализируемого сигнала. Таким образом, в усовершенствованном алгоритме рекурсивная

фильтрация применяется и к коэффициентам $d_{m,k}$. Такой алгоритм полной декомпозиции получил название вейвлет-пакетного разложения [8]. Схема разложения на основе вейвлет-пакетов представлена на рис. 2.

Для вейвлет-коэффициентов $Z_{m,n}(i)$ (на рис. 2) индекс m соответствует номеру уровня разложения, индекс n — номеру субполосы на уровне m , а $i = 0, 1, \dots, 2^m - 1$ — номеру вейвлет-коэффициента на уровне m . В вейвлет-пакетах для полной декомпозиции используется несколько базисов разложения, объединенных по образу вложенности друг в друга, что и дало название методу. В общем случае на каждом уровне иерархии может применяться свой специфический базис. В отличие от алгоритма Маллата применение вейвлет-пакетов дает возможность более полно учитывать тонкую структуру анализируемого процесса.

Действительно, абсолютные значения коэффициентов в вейвлет-пакетной декомпозиции имеют меньшие величины по сравнению с алгоритмом Маллата. Следовательно, можно утверждать, что аппроксимация при вейвлет-пакетах имеет гораздо меньшую погрешность.

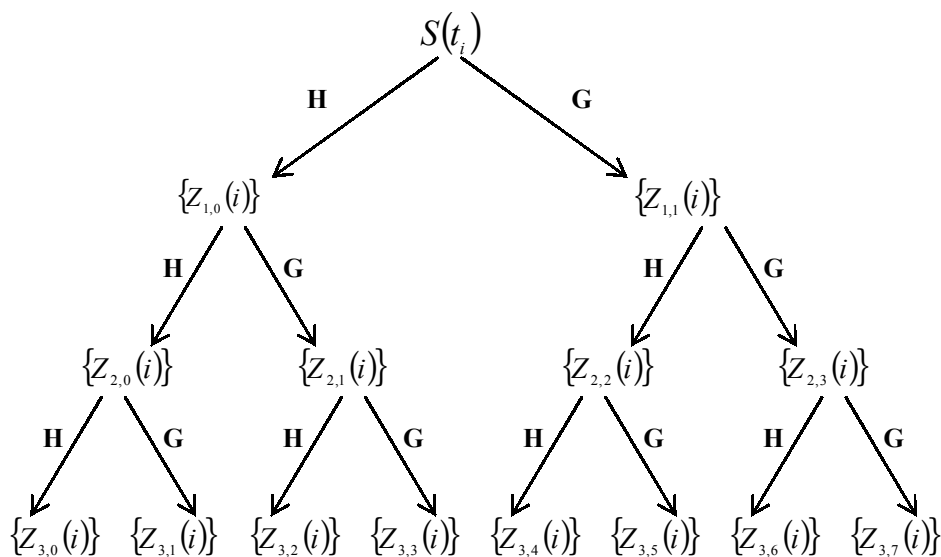


Рис. 2. Схема декомпозиции сигнальной последовательности на основе алгоритма вейвлет-пакетов

Поскольку вейвлет-базис является полным базисом разложения [9], то, следовательно, вейвлет-коэффициенты содержат в себе индивидуальные сведения об исходном радиосигнале, определяемые свойствами базисных функций в той же мере, что и спектральные составляющие ряда Фурье [10]. Таким образом, любое вейвлет-преобразование, в том числе и на основе применения вейвлет-пакетов, позволяет однозначно представлять обрабатываемый радиосигнал упорядоченной совокупностью его вейвлет-коэффициентов. Можно предположить возможность использования их в качестве признаков распознавания и, таким образом, положить расчет коэффициентов на базе вейвлет-пакетов в основу разрабатываемого метода.

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ПРИЗНАКОВ РАСПОЗНАВАНИЯ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-ПАКЕТОВ

Метод формирования признаков распознавания радиосигналов на основе вейвлет-пакетов определим следующим образом. В вейвлет-спектре, сформированном на основе вейвлет-пакетов, усредняется мощность рассчитанных вейвлет-коэффициентов в пределах каждой субполосы разложения. Усредненные коэффициенты нормируются и в соответствии с их местом в общей пирамиде вейвлет-пакетов слева направо и сверху вниз преобразуются в вектор признаков распознавания. Таким образом, в качестве первичных признаков распознавания будут выступать конкретные значения средней мощности вейвлет-коэффициентов по субполосам.

Необходимо отметить, что в общем случае полученные таким образом признаки будут коррелированными, поэтому целесообразно применение над вектором дополнительных декоррелирующих преобразований, что, кстати, позволит уменьшить размерность вторичного признакового пространства.

Рассмотрим этапы предложенного метода. Вначале исходная последовательность дискретных отсчетов сигнала $S(t_i)$ длиной N , кратной степени 2, при $i = 0, 1, 2, \dots, (N-1)$ декомпозируется на $K \leq \log_2(N)$ уровней в результате применения вейвлет-пакетного алгоритма. При этом на первом уровне исходный массив $S(t_i)$ раскладывается на два множества $Z_{1,0}(i)$ и $Z_{1,1}(i)$ путем свертки $S(t_i)$ с последовательностями $\{h\}$ и $\{g\}$, определяющими характеристики фильтров низкой и высокой частоты. На 2-м уровне рассмотренные процедуры свертки повторяются с каждым из полученных подмножеств $Z_{1,0}(i)$ и $Z_{1,1}(i)$. Процесс

полной декомпозиции, называемый вейвлет-пакетом, предусматривает проведение k этапов, аналогичных первому. Аналитически рассмотренные процедуры в общем виде можно представить следующими выражениями:

$$Z_{m,2n}(i) = \sum_{l=0}^{N-1} Z_{m-1,n}(i) h_{m,n}(i); \quad (5)$$

$$Z_{m,2n+1}(i) = \sum_{l=0}^{N-1} Z_{m-1,n}(i) g_{m,n}(i), \quad (6)$$

где $1 \leq m \leq K$, а $0 \leq n \leq (2^{m-1} - 1)$. На первом уровне разложения в качестве $Z_{0,0}(i)$ используются отсчеты $S(t_i)$. Значения элементов последовательностей $\{h\}$ и $\{g\}$ зависят от выбора вида масштабирующей функции $\varphi(x)$ и формы вейвлета $\psi(x)$ и в соответствии с (3) и (4) вычисляются следующим образом [7]:

$$h_{m,n}(i) = 2^{-m/2} \varphi(2^{-m}i - n), \quad (7)$$

$$g_{m,n}(i) = 2^{-m/2} \psi(2^{-m}i - n). \quad (8)$$

В результате проведенных преобразований в ходе декомпозиции последовательность отсчетов $S(t_i)$ раскладывается на $R = 2 \cdot 2^K - 1$ последовательностей (включая исходную) длиной $N/2^m$, каждая из которых представляет одну из частотных субполос исходного сигнала.

Очевидно, что различные радиосигналы будут иметь и различное распределение энергии по частотным субполосам, поскольку различны их спектры Фурье [10]. Если рассчитать среднюю мощность вейвлет-коэффициентов в каждой субполосе, то набор полученных значений будет отражать наполнение субполос распознаваемого радиосигнала аналогично частотному представлению. Более того, переход к средней мощности позволит использовать для распознавания относительно короткие входные реализации, что является важным моментом в работе систем экспресс-анализа. Ширина полосы частот, попавших в каждую из субполос, будет сужаться по мере увеличения номера уровня разложения, что следует из схемы вейвлет-пакета (рис. 2). Средние мощности вейвлет-коэффициентов в каждой субполосе, используемые в качестве признаков распознавания радиосигналов, вычисляются согласно следующему выражению:

$$\bar{P}_{m,n} = \frac{\sum_{i=n \cdot N/2^m}^{((n+1) \cdot N/2^m)-1} (Z_{m,n}(i))^2}{N/2^m}. \quad (9)$$

Для устранения чувствительности признаков к изменению средней мощности реализации распознаваемого радиосигнала значения $\bar{P}_{m,n}$, полученные по (9), нормируются относительно средней мощности $\bar{P}_{0,0}$ входной реализации $S(t_i)$.

Окончательно вектор признаков $\mathbf{Y} = \{y_r\}_R$, состоящий из упорядоченной последовательности усредненных мощностей вейвлет-коэффициентов, формируют путем последовательной записи для всех m и n вычисленных нормированных значений $\bar{P}_{m,n}$ слева направо и сверху вниз. Номер признака r определяется в соответствии с выражением

$$r = 2^m - 1 + n$$

и соответствует порядковому номеру составляющего элемента вектора $\mathbf{Y} = \{y_r\}_R$.

Важным моментом в реализации метода является выбор базисных функций $\varphi(x)$ и вейвлета $\psi(x)$. Во-первых, следует учитывать размеры частотно-временного окна. Во-вторых, гладкость и симметрию базисного вейвлета. В-третьих, определить (задать) порядок аппроксимации [5]. Правильный подбор соответствующего распознаваемым классам сигналов вейвлет-базиса существенно снижает число ненулевых вейвлет-коэффициентов $Z_{m,n}(i)$, что значительно сокращает размер признакового пространства.

ФОРМИРОВАНИЕ ВЕКТОРА ПРИЗНАКОВ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-ПАКЕТОВ ПРИ РАСПОЗНАВАНИИ РАДИОСИГНАЛОВ

Для исследования контрастности векторов признаков, сформированных на основе предложенного метода, были проведены практические эксперименты. В частности, на рис. 3 и 4 представлены векторы признаков радиосигнала четырехпозиционной фазовой манипуляции (ФМ-4) со скоростью 9600 бод, рассчитанные в различных базисах разложения.

Так, в первом случае (рис. 3) для получения вейвлет-коэффициентов использован вейвлет-пакет на основе базиса Хаара, масштабирующая функция которого является B -сплайном 1-го порядка. Во втором случае (рис. 4) признаки распознавания рассчитаны в базисе более гладких функций — B -сплайнов 2-го порядка.

Сравнительный анализ результатов на рис. 3 и 4 показывает, что при выборе более гладкой базисной функции количество значений y_r , близких к нулю, в векторе признаков $\mathbf{Y} = \{y_r\}_R$ возрастает. Следовательно, использование в качестве базисных функций вейвлетов, согласованных по степени гладкости с распознаваемыми сигналами, позволяет сократить размер признакового пространства.

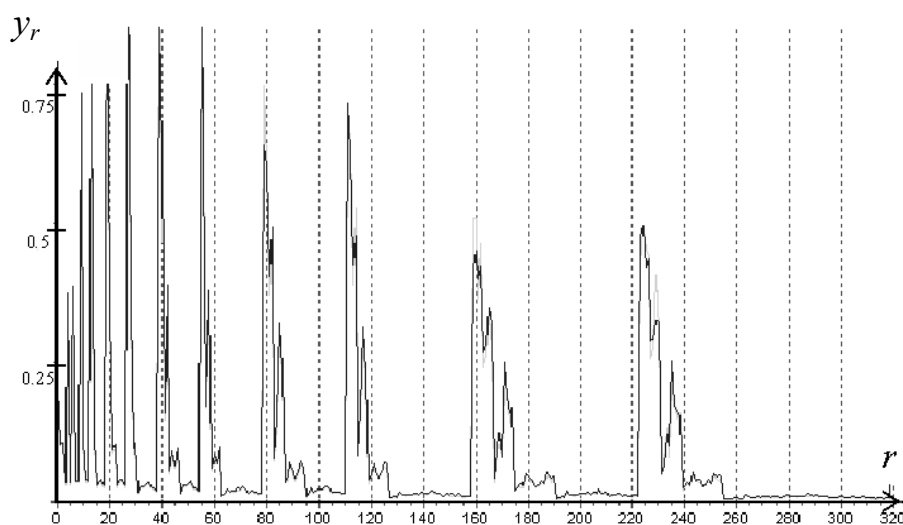


Рис. 3. Компоненты вектора признаков радиосигнала ФМ-4 9600 бод, рассчитанные в базисе Хаара (первые 320 отсчетов)

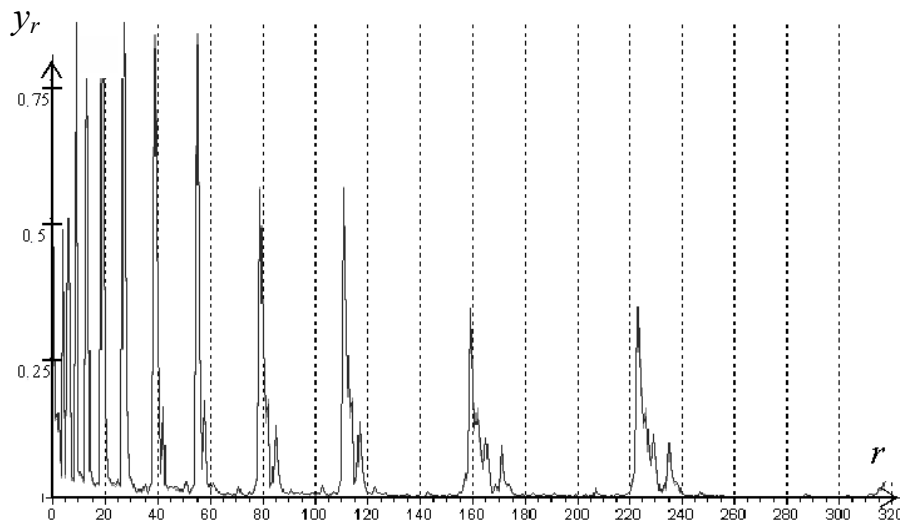


Рис. 4. Компоненты вектора признаков радиосигнала ФМ-4 9600 бод, рассчитанные в базисе B -сплайнов 2-го порядка (первые 320 отсчетов)

Для подтверждения гипотезы о целесообразности построения систем распознавания радиосигналов на основе вейвлет-пакетов, использующих значения $\mathbf{Y} = \{y_r\}_R$, полученные в соответствии с (9), в качестве признаков распознавания, были проведены исследования с моделями четырех классов радиосигналов характерных для ОВЧ-, ВЧ-диапазонов частот. В качестве базового был выбран сигнал частотной манипуляции с разносом 450 Гц (ЧМ-2-450) и скоростями: 50, 100, 150 и 175 бод. Предложенный выбор диапазона скоростей манипуляции позволил синтезировать тестовые сигналы с близкой частотной структурой. Разработанный метод формирования признакового пространства сравнивался с подходом, предложенным Омельченко в [10], который базируется на спектральных составляющих классического гармонического преобразования Фурье.

Некоторые результаты исследования представлены на рис. 5–7.

В эксперименте использовались реализации сигналов длительностью $N = 512$ отсчетов, декомпозиция проводилась на $m = 8$ уровней разложения. Указанный подход позволил получить вектор признаков $\mathbf{Y} = \{y_r\}_R$ длиной $R = 511$. Для декомпозиции использовался базис разложения на основе вейвлета Хаара, одного из простейших ортогональных вейвлетов с компактным носителем.

В указанных преобразованиях масштабирующая функция $\varphi(x)$ и вейвлет $\psi(x)$ определялись следующими выражениями [6]:

$$\begin{aligned} \varphi(x) &= \begin{cases} 1, & x \in [0, 1); \\ 0, & x \notin [0, 1); \end{cases} \\ \psi(x) &= \begin{cases} 1, & x \in [0, 0.5); \\ -1, & x \in [0.5, 1); \\ 0, & x \notin [0, 1). \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

Применение базиса Хаара позволяет минимизировать вычислительные затраты при формировании признаков распознавания.

Разработанный метод предполагает создание эталонов и формирование признаков при одинаковом значении основной частоты в тракте обработки. С целью обеспечения инвариантности системы распознавания к частотным сдвигам предложено ранжировать вейвлет-коэффициенты в каждой из субполос декомпозиции. При этом контрастность формируемых образов снижается не более чем на 10–15 %.

В таблице представлены результаты, характеризующие контрастность при попарном сравнении признаков, полученных для тестовых сигналов

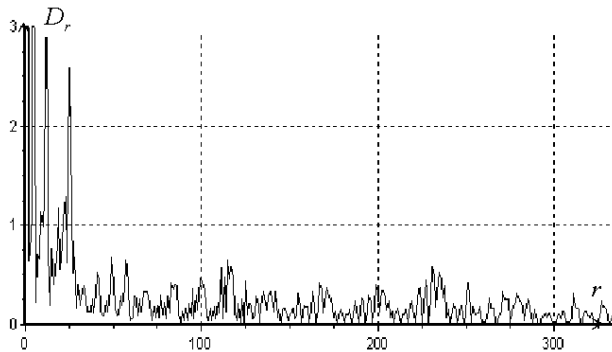


Рис. 5. Усредненное значение межклассового расстояния в методе на основе вейвлет-пакетов в базисе Хаара без ранжирования признаков для сигнала ЧМ-2-450 со скоростями 50, 100, 150 и 175 бод

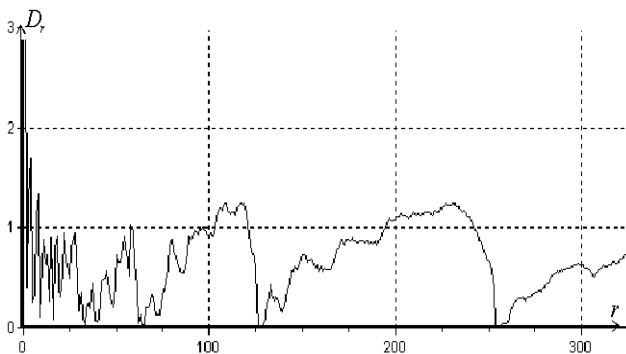


Рис. 6. Усредненное значение межклассового расстояния в методе на основе вейвлет-пакетов в базисе Хаара с ранжированием признаков для сигнала ЧМ-2-450 со скоростями 50, 100, 150 и 175 бод

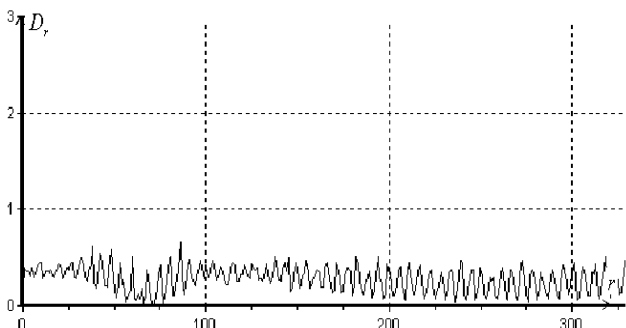


Рис. 7. Усредненное значение межклассового расстояния в методе на основе спектральных коэффициентов Фурье для сигнала ЧМ-2-450 со скоростями 50, 100, 150 и 175 бод

Результаты попарного сравнения контрастности признаков тестовых сигналов, полученных с использованием: метода на основе вейвлет-пакетов в базисе Хаара без ранжирования признаков (А); метода на основе вейвлет-пакетов в базисе Хаара с ранжированием признаков (Б); метода на основе спектральных коэффициентов Фурье (В)

Сравни- ваемые скорости (бод)	Метод		
	А	Б	В
50/100	151	129	47
50/150	262	352	8
50/175	1130	1010	179
100/150	43	85	45
100/175	582	401	104
150/175	378	358	166

с использованием: метода на основе вейвлет-пакетов в базисе Хаара без ранжирования признаков; метода на основе вейвлет-пакетов в базисе Хаара с ранжированием признаков; метода на основе спектральных коэффициентов Фурье (метод Омелченко).

Качество сформированных признаков оценивалась по значению показателя разделимости классов J , представляющего собой отношение следов матриц S_1 и S_2 :

$$J = \text{tr}S_1 / \text{tr}S_2, \quad (11)$$

где матрица S_1 характеризует среднее межклассовое расстояние, а матрица S_2 — средний внутриклассовый разброс, вычисляемых в соответствии с [3].

Анализ полученных результатов показывает, что контрастность образов выбранных тестовых сигналов в среднем в 4 раза выше в признаковом пространстве, сформированном на основе разработанного метода, чем на основе метода, использующего спектральные коэффициенты Фурье.

Для исследования влияния шума на устойчивость векторов признаков, сформированных на основе вейвлет-пакетов, был проведен ряд экспериментов для смеси радиосигнала ФМ-2 1200 бод с белым шумом при ОСШ 30, 16 и 6 дБ (мощность шума измерялась в полосе анализа). На рис. 8 представлены все три вектора признаков, развернутые вдоль оси абсцисс.

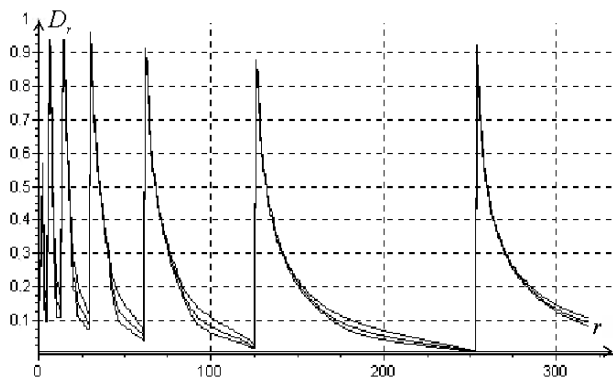


Рис. 8. Векторы признаков сигнала ФМ-2 1200 бод, полученные при ОСШ 6, 16 и 30 дБ

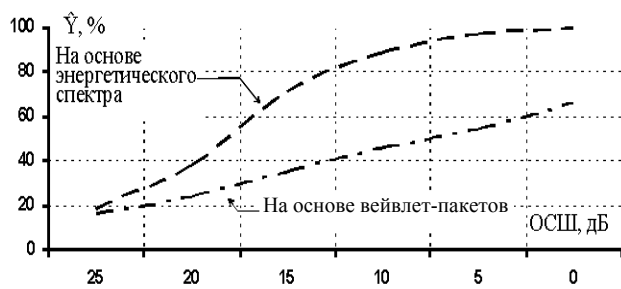


Рис. 9. Зависимость взаимной нормированной величины внутриклассового разброса признаков от ОСШ для сигнала ЧМ-2-450 50 бод

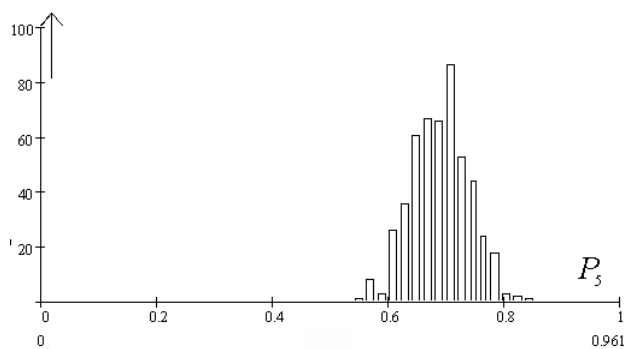


Рис. 10. Гистограмма распределения пятого признака радиосигнала ФМ-4 9600 бод при ОСШ 10 дБ

На рис. 9 представлены результаты сравнительного анализа устойчивости признаков сигнала

ЧМ-2-450 50 бод, полученных на основе вейвлет-пакетов и на основе энергетического спектра. При различном ОСШ рассчитывалась величина суммарного отличия полученных признаков от их эталонных значений [3]. Затем значения нормировались относительно максимума. Таким образом, удалось установить, что при ОСШ ниже 20 дБ признаки, полученные на основе разработанного метода, в 1.5–2 раза устойчивее по отношению к признакам, полученным на основе традиционного спектра.

Процедура принятия решения о принадлежности распознаваемых реализаций радиосигналов к эталонным значениям значительно упрощается, если признаки распознавания имеют нормальное распределение. С целью установления закона распределения признаков была проведена серия из 500 экспериментов. По их результатам строились распределения, значения которых оценивались методом гистограмм по критерию Крамера—Мизеса—Смирнова [11]. Выявлено, что в целом распределение признаков для разработанного метода подчиняется нормальному закону, что позволяет существенно упростить выбор и определение решающего правила. В качестве примера на рис. 10 приведена гистограмма распределения пятого признака для радиосигнала ФМ-4 9600 бод при ОСШ 10 дБ.

Необходимо также отметить, что применение базиса Хаара позволяет существенно сократить вычислительные затраты, а значит, упростить алгоритм формирования признаков распознавания [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали состоятельность разработанного метода формирования признаков распознавания на основе вейвлет-пакетов. Важнейшим показателем результативности эксперимента является повышение контрастности признаков пространств, т. е. увеличения межклассового расстояния у сформированной системы признаков для сигналов с близкой частотно-временной структурой. Даже визуальный анализ полученных значений $\mathbf{Y} = \{y_r\}_R$ (рис. 5–7) позволяет выявить существенные отличия структуры векторов признаков, сформированных по относительно коротким реализациям, что доказывает потенциальную возможность использования представленного метода для распознавания сигналов в системах экспресс-анализа. Поскольку признаки распознавания распределены по нормальному закону, то последующая процедура принятия решения о принадлежности распознаваемых реализаций радиосигналов к тому или иному классу значительно упрощается.

Дальнейшее направление исследований авторами видится в выявлении потенциальных возможностей разработанного метода по распознаванию сигналов в различных условиях сигнально-помеховой обстановки, а также в выборе и обосновании критерия при реализации процедур распознавания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гонсалес Р., Ту Дж. Принципы распознавания образов. М.: Мир. 1978. 411 с.
2. Алексеев А. А., Кириллов А. Б. Технический анализ сигналов и распознавание радиоизлучений. СПб.: ВАС, 1998. 368 с.
3. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов. Пер. с англ. М.: Наука., 1979. 368 с.
4. Переберин А. В. О систематизации вейвлет-преобразований // Вычислительные методы и программирование. 2001. Т. 2. С. 15–40.
5. Дьяконов В. MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник. СПб.: Питер, 2002. 608 с.
6. Воробьев В. И., Грибунин В. Г. Теория и практика вейвлет-преобразования. СПб.: ВУС, 1999. 208 с.
7. Mallat S. A theory for multiscale signal decomposition: The wavelet representation // Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1989, July. V. 11. P. 674–693.
8. Coifman R. R., Meyer Y., Wickerhauser V. Wavelet analysis and signal processing wavelets: Wavelets and their applications. Boston: Jones and Barlett, 1992. P. 153–178.
9. Daubechies I. The wavelet transform, time-frequency localisation and signal analysis // IEEE Transaction Theory. 1990, Sept. V. 36, N 5. P. 961–1005.
10. Омельченко В. А., Матецкий Е. О., Балабанов В. В., Безрук В. М. Распознавание случайных сигналов по спектру // Изв. вузов: Радиоэлектроника. 1979. Т. 22, № 12. С. 16–22.
11. Айвазян С. А., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. Справочное изд. М.: Финансы и статистика, 1983. 471 с.

Военный университет связи, Санкт-Петербург

Материал поступил в редакцию 25.11.2003.

SIGNAL IDENTIFICATION METHOD BASED ON WAVELET-PACKETS

S. V. Dvornikov, A. M. Saukov

Military University of Communication, Saint-Petersburg

A feature forming method for signal identification based on wavelet-packet processing is offered. The results of theoretical and experimental research confirming separation of the feature spaces formed are presented. The effect is achieved due to application of more complicated signal processing procedures which use scale-time analysis techniques.