

## РАСПОЗНАВАНИЕ СИГНАЛОВ КВАДРАТУРНОЙ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-КОЭФФИЦИЕНТОВ ИХ ФРЕЙМОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

С. В. ДВОРНИКОВ, А. С. ДВОРНИКОВ

*Военная академия связи им. С. М. Буденного, 194064, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: practicsv@yandex.ru*

Представлены материалы исследований по распознаванию сигналов с близкой частотно-временной структурой. Предлагается использовать в качестве признаков распознавания упорядоченные последовательности их вейвлет-коэффициентов. Обоснована целесообразность синтеза вейвлет-коэффициентов на основе фреймовых преобразований. Проанализированы результаты компьютерного моделирования, подтверждающие правомерность выбора. Определены основные этапы алгоритма, реализующего предложенный подход.

**Ключевые слова:** *распознавание сигналов, вектор признаков, фреймовое преобразование.*

**Введение.** Спектральная эффективность и помехоустойчивость сигналов квадратурной амплитудной модуляции (КАМ, QAM — Quadrature Amplitude Modulation) [1], таких как КАМ-16, КАМ-64, КАМ-256, способствовали их широкому применению в системах радиосвязи и телевидения, в том числе нелегитимно использующих выделенный частотный ресурс. В таких ситуациях возникает задача своевременного распознавания сложных сигнально-кодовых конструкций по видам модуляции, решение которой возложено на системы радиоконтроля. В настоящей работе предложено решение сформулированной задачи (в условиях ограничений на длительности обрабатываемых реализаций).

**Анализ спектральной структуры сигналов КАМ и постановка задачи распознавания.** Квадратурное представление является удобным и достаточно универсальным средством описания сигналов. Исходное колебание формируется на основе линейной комбинации квадратурной ( $\cos \omega t$ ) и синфазной ( $\sin \omega t$ ) составляющих, манипулируемых биполярными информационными импульсами  $x(t)$  и  $y(t)$ :

$$S(t) = x(t) \sin(\omega t + \varphi) + y(t) \cos(\omega t + \varphi). \quad (1)$$

Таким образом, для системы, поддерживающей  $m$  амплитудных уровней для каждого потока биполярных импульсов, можно образовать  $m^2$  различных комбинаций логических нуля и единицы.

В частности, синтез сигналов КАМ-16 предполагает четыре значения уровня для  $x(t)$  и  $y(t)$ , равных  $\pm 1, \pm 3$ . Соответственно для КАМ-64 потребуется 8-уровневая система, а для КАМ-256 — 16-уровневая. Общность методологии синтеза сигналов КАМ определяет схожесть их частотно-временной структуры (рис. 1, *a* — спектр сигнала КАМ-16, *b* — КАМ-32, *в* — КАМ-64).

Структурная близость рассматриваемых сигналов существенно затрудняет эффективное применение спектральных образов для распознавания. Следовательно, необходимо определить общие параметры сигналов КАМ, совокупность которых наделяет каждый модуляционный формат индивидуальными признаками.

Сформулируем задачу формирования пространств признаков с позиций теории распознавания образов [2]. В качестве объекта исследования выберем вектор признаков реализации обрабатываемого сигнала  $\{Y_k\}$ , где  $k = 1, 2, \dots, K$  ( $K$  — число распознаваемых классов сигналов).

Тогда распознавание можно трактовать как отнесение векторов признаков реализации обрабатываемого сигнала к одному из взаимоисключающих классов  $\{S_l\}_L = \{S_1, S_2, \dots, S_L\}$ , где  $l = 1, 2, \dots, L$  ( $L$  — число эталонных образов), которые определяются совокупностью векторов признаков эталонных образов сигналов  $\{S_l\}_L$  (в рассматриваемом случае класс сигнала определяется видом модуляционного формата).

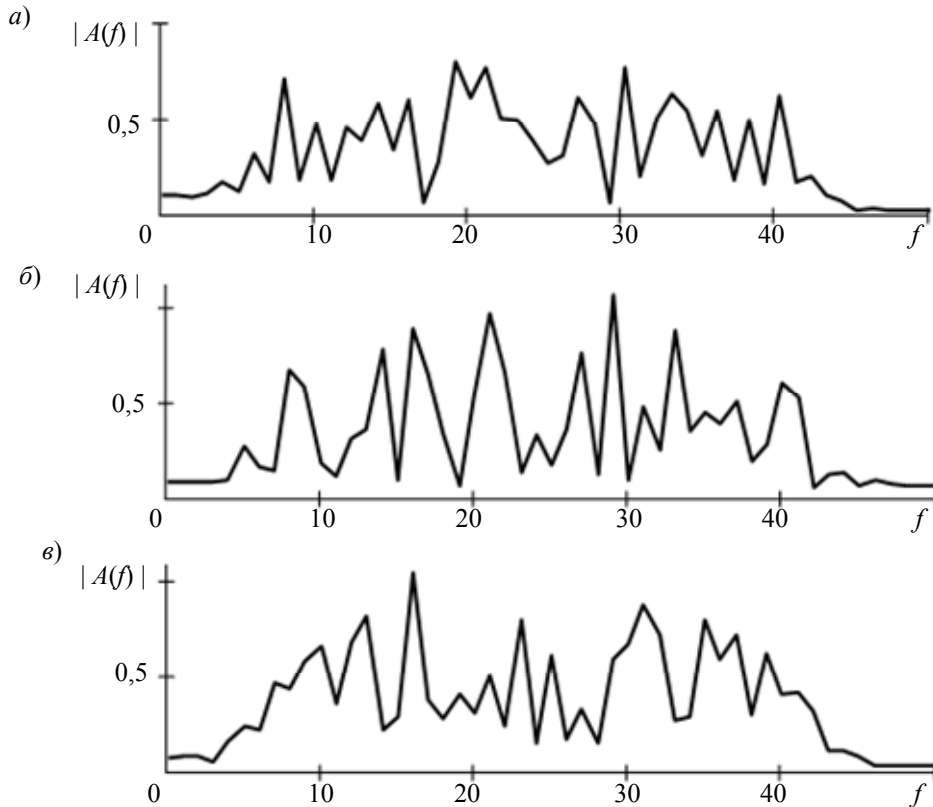


Рис. 1

В общем случае  $L \leq K$  (один из классов может характеризовать совокупность всех нераспознанных сигналов, к которым может быть отнесен и шум).

При этом каждая реализация отображается на множество  $L$  классов форматов  $\{S_l\}_L$ ; отображение является однозначным, если вектор признаков любой реализации  $\{Y_k\}$  всегда определяется только одним из значений  $\{S_l\}_L$ , т.е.  $\{S_l\} \leftarrow \{Y_k\}$ .

Поскольку первоначальный набор признаков формируется из числа доступных измерению параметров сигнала, отражающих наиболее существенные для распознавания свойства, признаки должны выбираться таким образом, чтобы, проанализировав их, можно было выделить различия характеризуемых ими классов. Другими словами, вектор разности признаков  $\{X_{k-l}\}$  должен быть максимальным для любых  $k$  и  $l$ , принадлежащих множеству распознаваемых сигналов и классов эталонных сигналов [3].

С указанных позиций процесс распознавания можно будет свести к процедурам вычисления вектора

$$\{X_{k-l}\} = |\{Y_k\} - \{S_l\}|. \quad (2)$$

Очевидно, что корректность вычисления (2) подразумевает соблюдение идентичности размерности признакового пространства для всех характеризуемых классов.

Согласно работе [3], признаки целесообразно выбирать из условий обеспечения контрастности распознаваемых классов. Следовательно, чем больше пространство признаков, тем точнее (при прочих равных условиях) можно разделить характеризуемые им объекты. Но увеличение пространств связано с усложнением системы, поэтому применительно к рассматриваемой проблематике задачу распознавания сформулируем в следующем виде:

$$\max |\{\mathbf{Y}_k\} - \{\mathbf{S}_l\}|, \text{ для } \forall k \in \{\mathbf{Y}_{k_1, \dots, k_N}\}, l \in \{\mathbf{S}_{l_1, \dots, l_N}\}; \text{ при } N \rightarrow \min. \quad (3)$$

Согласно (3), необходимо определить пространство, в котором минимальный набор признаков по  $N$  обеспечит бы максимальное различие распознаваемых объектов  $\{\mathbf{Y}_k\}$  или позволит получить максимальное значение вектора  $\{\mathbf{X}_{k-l}\}$ , характеризующего межклассовое расстояние.

**Формирование векторов признаков сигналов на основе вейвлет-коэффициентов их фреймовых преобразований.** Анализ работ [3—5] показал целесообразность формирования векторов признаков на основе вейвлет-коэффициентов (ВК), поскольку в этом случае обеспечивается приемлемая устойчивость к аддитивным шумам при достаточной степени детализации распознаваемых сигналов.

Применительно к распознаванию сигналов дискретной манипуляции наилучшие результаты, согласно [5], дают фреймовые формы, синтез которых осуществляют на основе непрерывного вейвлет-преобразования (ВП).

Согласно монографии [6], непрерывное ВП представляет скалярное произведение анализируемого сигнала  $s(t)$  и базисных вейвлет-функций:

$$W(f_m, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) f_m^{-1/2} \psi^* \left( \frac{t-\tau}{f_m} \right) dt = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi_{f_m, \tau}^*(t) dt, \quad (4)$$

где  $\psi^*(t)$  — комплексно-сопряженный с обрабатываемым сигналом материнский вейвлет, из которого с помощью частотного масштабирования и временных сдвигов формируются все базисные функции:

$$\psi_{f_m, \tau}(t) = f_m^{-1/2} \psi^* \left( \frac{t-\tau}{f_m} \right), \quad (5)$$

здесь  $\tau$  определяет величину сдвига масштабированной вейвлет-функции вдоль оси времени;  $f_m$  — частотный масштаб, который для фреймовых ВП представляется дискретным набором чисел  $m = 1, \dots, M$  ( $M$  — число масштабов фреймового представления). В общем случае параметр  $f_m$  можно рассматривать как аналог частоты в анализе Фурье.

Главным достоинством ВП является возможность адаптивного отображения обрабатываемого сигнала при различных масштабах частотного разрешения. И если в непрерывном ВП масштаб частоты, как правило, меняется с шагом 1 Гц, то во фреймах он может быть кратным, например, степени двойки. Это позволяет значительно сократить избыточность описания.

С учетом рассмотренных особенностей фреймового ВП определим основные этапы алгоритма формирования признаков сигналов и их последующего распознавания.

1. Определяют  $L \geq 2$  классов распознавания, для которых синтезируют характеризующие их эталонные сигналы в виде набора дискретных отсчетов.

2. На основе фреймового ВП из ВК формируют матрицу распределения энергии (РЭ)  $\mathbf{M}_l$  для каждого  $l$ -го эталонного сигнала.

3. Из ВК матрицы РЭ  $\mathbf{M}_l$  каждого  $l$ -го эталонного сигнала формируют вектор признаков  $\{\mathbf{S}_l\}_L$  путем последовательной конкатенации строк матрицы.

4. Дискретные отсчеты реализации распознаваемого сигнала разбивают на  $r$  фрагментов, длительность которых совпадает с длительностью эталонов.

5. Для каждого фрагмента распознаваемого сигнала формируют  $r$  векторов признаков  $\{\mathbf{Y}_{k,n}\}$  аналогично эталонным сигналам.

6. Формируют вектор признаков распознаваемого сигнала  $\{\mathbf{Y}_k\}$  путем усреднения векторов признаков  $\{\mathbf{Y}_{k,n}\}$  всех  $r$  фрагментов.

7. По результатам выбора наименьшего значения модуля разности между его вектором признаков и векторами признаков каждого эталонного сигнала, в соответствии с выражением (2), идентифицируют сигнал.

**Результаты моделирования.** С целью проверки работоспособности предложенного алгоритма был проведен эксперимент по распознаванию сигнала КАМ-64 в пространстве признаков эталонных сигналов КАМ-16, КАМ-32 и КАМ-64. Эталонные сигналы имеют близкую частотно-временную структуру. Так, на рис. 2 приведены матрицы РЭ из ВК эталонных сигналов КАМ-16 (а) и КАМ-64 (б), в эксперименте в качестве базисного использовался вейвлет Гаусса 2-го порядка.

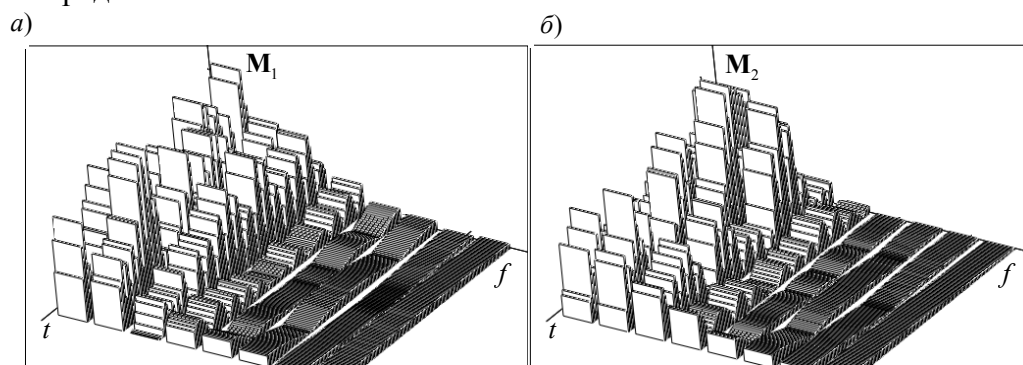


Рис. 2

В соответствии с алгоритмом из матриц РЭ формируют векторы признаков. В качестве примера на рис. 3 представлен вектор признаков сигнала КАМ-64 до упорядочивания ВК (а) и после (б).

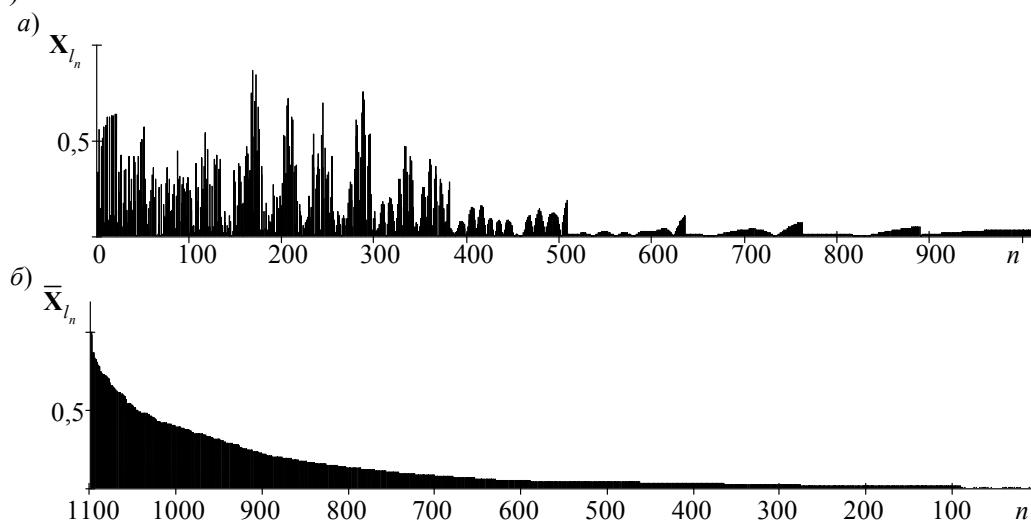
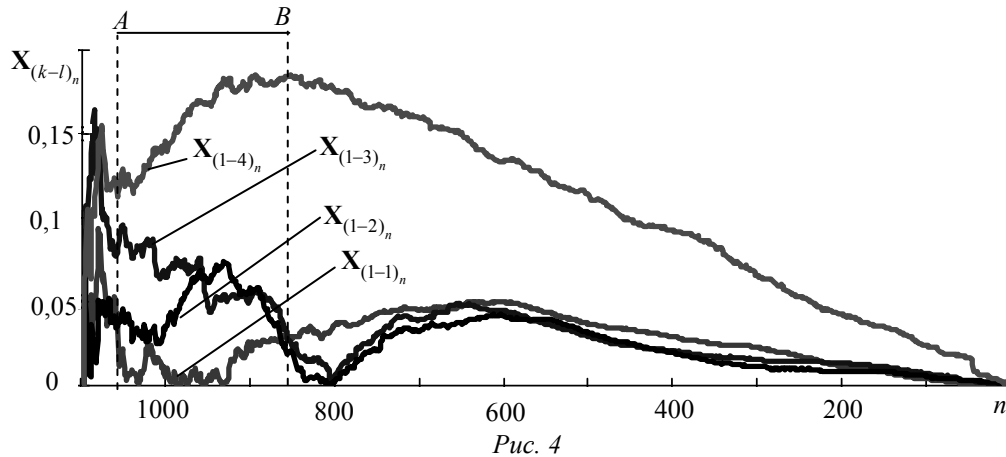


Рис. 3

Следует отметить, что визуальный анализ синтезированных матриц РЭ (см. рис. 2) подтверждает близость структуры эталонных сигналов даже на уровне представления их в частотно-временном пространстве, что указывает на сложность реализации процедур распознавания.

Между тем в работе [7] установлено, что информативность вектора признаков распознаваемой реализации во многом зависит от информационного компонента, представляющего совокупность нулей и единиц в модулирующей последовательности. Именно поэтому с целью минимизации его влияния на структуру матриц РЭ фреймовых ВП предлагается при выполнении 4-го этапа алгоритма распознаваемую реализацию разбивать на фрагменты, для каждого из которых формировать свой вектор признаков. И уже затем, на 6-м этапе формировать вектор признаков реализации обрабатываемого сигнала путем усреднения векторов признаков всех фрагментов.

На рис. 3 вектор признаков нормированных и ранжированных ВК сигнала КАМ-64 обозначен как  $\bar{X}_{1_n}$  (в рассматриваемом эксперименте реализацию распознаваемого сигнала разбивали на семь фрагментов). В соответствии с 7-м этапом алгоритма перед процедурой распознавания предварительно рассчитывают модули векторов разности признаков  $\{X_{k-l}\}$  между распознаваемым и эталонными сигналами (рис. 4, КАМ-64 —  $X_{(1-1)_n}$ ; КАМ-16 —  $X_{(1-2)_n}$ ; КАМ-32 —  $X_{(1-3)_n}$ ;  $X_{(1-4)_n}$  — между распознаваемым сигналом КАМ-64 и шумом).



Согласно рис. 4, различные компоненты векторов признаков по-разному отражают индивидуальные свойства распознаваемых сигналов. Очевидно, что целесообразно выбирать при распознавании те, что обеспечивают наибольшую контрастность пространств признаков для распознаваемого сигнала по отношению к альтернативным. В эксперименте использовались значения векторов признаков, расположенных в границах отрезка  $AB$ .

Для получения количественной оценки контрастности введем показатель

$$R_{l-j} = \frac{\sum_{n=B}^A X_{k-l_n}}{\sum_{n=B}^A X_{k-j_n}}, \tag{6}$$

где  $j$  и  $l$  — текущие значения распознаваемых классов.

Согласно (6), чем ближе распознаваемый сигнал к эталону, тем меньше значение  $\sum_{n=B}^A X_{k-j_n}$  и соответственно больше  $R_{l-j}$ .

Для рассматриваемого случая полагаем, что  $k=1$  — распознаваемый сигнал КАМ-64;  $j=1$  — эталон сигнала КАМ-64;  $l=2$  — эталон КАМ-16;  $l=3$  — эталон КАМ-32;  $l=4$  — эталон шума. В эксперименте эталон шума введен для того, чтобы оценить устойчивость признакового пространства к воздействию шумов.

В таблице приведены результаты расчетов, характеризующих зависимость значения показателей контрастности  $R_{2-1}$ ,  $R_{3-1}$ ,  $R_{4-1}$ , рассчитанных согласно (6), от отношения сигнал/шум (ОСШ).

**Зависимость показателей контрастности от ОСШ**

$R_{l-j}$	ОСШ, дБ			
	12	10	8	6
$R_{2-1}$	6,3	2,4	1,6	1,2
$R_{3-1}$	6,4	2,7	1,8	1,3
$R_{4-1}$	21,8	16,6	12,0	6,8

Анализ полученных результатов показывает, что повышение интенсивности шумов приводит к тому, что вектор признаков по своей структуре все более становится схожим с вектором реализации шума. При этом разработанный подход обеспечивает приемлемую контрастность пространств признаков при ОСШ  $< 6$  дБ для сигналов КАМ с близкой частотно-временной структурой.

**Заключение.** Проведены исследования, подтверждающие правомерность выбора для формирования вектора признаков ВК фреймовых преобразований. Результирующие векторы, несмотря на компактность их представления, обеспечивают требуемые различия для сигналов с близкой частотно-временной структурой.

Разработанный подход требует дальнейших исследований. Так, необходимо выработать критерий выявления контрастных ВК для формирования вторичных векторов признаков. Кроме того, открытыми остались вопросы выбора требуемого числа фрагментов, на которые целесообразно разбивать входную реализацию, а также определения минимальной длительности самого фрагмента, при которой обеспечивается приемлемая контрастность пространств признаков.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прокис Дж. Цифровая связь / Пер. с англ.; под ред. Д. Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
2. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов. М.: Наука, 1979. 368 с.
3. Дворников С. В., Сауков А. М. Метод распознавания радиосигналов на основе вейвлет-пакетов // Научное приборостроение. 2004. Т. 14, № 1. С. 85—93.
4. Дворников А. С., Дворников С. В. и др. Метод измерения параметров кратковременных сигналов на основе распределения Алексева // Информация и космос. 2011. № 1. С. 66—78.
5. Дворников А. С., Дворников С. В. и др. Формирование признаков и распознавание сигналов на основе обработки их фреймовых преобразований // Информация и космос. 2011. № 2. С. 7—15.
6. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории к практике. М.: СОЛОН-Р, 2002. 448 с.
7. Пат. 2356064 РФ. Способ распознавания радиосигналов / С. В. Дворников, А. С. Дворников, И. Н. Оков и др. 24.04.2007.

#### Сведения об авторах

**Сергей Викторович Дворников** — д-р техн. наук, профессор; Военная академия связи им. С. М. Буденного; E-mail: practcdsv@yandex.ru

**Александр Сергеевич Дворников** — адъюнкт; Военная академия связи им. С. М. Буденного

Рекомендована академией

Поступила в редакцию  
10.12.14 г.

**Ссылка для цитирования:** Дворников С. В., Дворников А. С. Распознавание сигналов квадратурной амплитудной модуляции на основе вейвлет-коэффициентов их фреймовых преобразований // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 6. С. 421—427.

#### RECOGNITION OF QAM-SIGNALS ON THE BASE OF WAVELET-COEFFICIENTS OF THEIR FRAME TRANSFORMS

S. V. Dvornikov, A. S. Dvornikov

S. M. Budenny Military Academy of Communications, 194064, Saint Petersburg, Russia  
E-mail: practcdsv@yandex.ru

Results of investigation on recognition of signals with similar time-and-frequency structure are presented. Arranged sequences of signals wavelet coefficients are proposed to be used as indicators for the signals recognition. Feasibility of wavelet coefficients synthesis based on frame transforms is justified. Computer simulation data are analyzed. Basic stages of the algorithm realizing the proposed approach are determined.

**Keywords:** signal recognition, indicators vector, frame transform.

**Data on authors**

**Sergey V. Dvornikov** — Dr. Sci., Professor; S. M. Budenny Military Academy of Communications; E-mail: practicsv@yandex.ru  
**Alexander S. Dvornikov** — Graduate; S. M. Budenny Military Academy of Communications

**Reference for citation:** *Dvornikov S. V., Dvornikov A. S.* Recognition of QAM-signals on the base of wavelet-coefficients of their frame transforms // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie*. 2015. Vol. 58, N 6. P. 421—427 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-6-421-427