

# Алгоритм формирования признаков сигналов квадратурной амплитудной модуляции на основе упорядоченных коэффициентов их фреймовых преобразований

**Дворников А.С.**

Военная академия связи, г. Санкт-Петербург

## Аннотация

Предлагается алгоритм формирования признаков для сигналов квадратурной модуляции с близкой частотно-временной структурой. Обосновывается применение в качестве признаков распознавания упорядоченных последовательности вейвлет-коэффициентов фреймовых преобразований. Анализируются результаты компьютерного моделирования.

**Ключевые слова:** алгоритм; квадратурная амплитудная модуляция; упорядоченные коэффициенты; фреймовые преобразования, система радиоконтроля.

## Введение

Положительные свойства сигналов квадратурной амплитудной модуляции (КАМ), определяемые спектральной эффективностью и помехоустойчивостью, способствовали их широкому применению в радиоканалах, в том числе источниками, нелегитимно использующих частотный ресурс. В связи с этим у системы радиоконтроля возникла необходимость их распознавания. Целью настоящей статьи является разработка метода формирования признаков сигналов КАМ-16, -32, -64, имеющих близкую частотно-временную структуру.

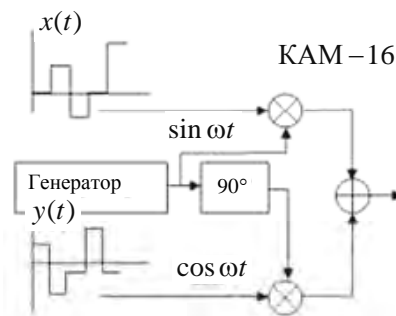
## Результаты анализа частотно-временной структуры сигналов КАМ

Квадратурное представление сигналов является удобным и достаточно универсальным средством их описания на основе линейной комбинацией двух ортогональных составляющих – синуса и косинуса [1]:

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

где  $x(t)$  и  $y(t)$  – биполярные дискретные величины.

На рис. 1 показана структурная схема модулятора КАМ-16, в которой  $x(t)$  и  $y(t)$  принимают значения  $\pm 1, \pm 3$  (4-х уровневая КАМ).



**Рис 1.** Структурная схема модулятора сигнала КАМ-16

Аналогичным образом формируются сигналы КАМ более высокой  $m$ -ичности. Общность методологии синтеза сигналов КАМ наделяет их близкой частотно-временной структурой. В частности, на рис. 2 показаны спектры сигналов КАМ-16, КАМ-32 и КАМ-64.

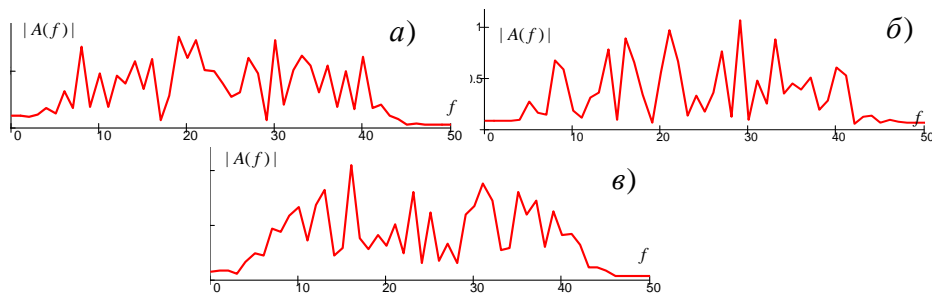


Рис. 2. Спектры сигналов: КАМ-16 – а); КАМ-32 – б); КАМ-64 – в).

Анализ полученных результатов показывает, что спектры данных сигналов имеют близкую структуру, что затрудняет получить на их основе контрастные векторы признаков для последующего распознавания.

### Постановка задачи формирования векторов признаков

Задачу формирования признаков пространств предлагается трактовать с позиций теории распознавания образов [2]. При этом в качестве объекта исследования рассматривать реализацию обрабатываемого сигнала  $\{Yk\}$ , где  $k = 1, 2, \dots, K$ . Здесь  $K$  – число распознаваемых классов. Тогда распознавание можно трактовать как отнесение реализации обрабатываемого сигнала к одному из взаимоисключающих классов  $\{S\} = \{S_1, S_2, \dots, S_L\}$ , где  $l = 1, 2, \dots, L$ , которые определяются совокупностью эталонных образов сигналов  $\{S_l\}$ . В рассматриваемом случае класс сигнала определяется видом модуляционного формата. Число эталонов  $L$ , может быть меньше числа распознаваемых классов сигналов  $K$  (в этом случае один из классов характеризует совокупность всех нераспознанных сигналов, к которым может быть отнесена и реализация шума).

Каждая реализация отображается на множество  $L$ -классов распознаваемых модуляционных форматов  $\{S\} = \{S_1, S_2, \dots, S_L\}$ . Указанное отображение является однозначным, когда любая реализация  $\{Yk\}$  определяется одним из значений  $\{S\}$ , т.е.  $\{S_l\} \leftarrow \{Yk\}$ . Первоначальный набор признаков формируется из числа доступных измерению параметров сигнала, чтобы в результате их анализа обеспечивалась возможность различия характеризуемых ими классов, т.е. вектор разности признаков  $\{Xkl\}$  был максимальным для любых  $k$  и  $l$ , принадлежащих множеству распознаваемых сигналов  $\{Yk\}$  и эталонов  $\{S\}$  [3].

$$\max |\{Yk\} - \{S_l\}|, \quad \text{для } \forall k \in \{Yk_{1..N}\}, l \in \{S_l_{1..N}\}; \text{ при } N \rightarrow \min. \quad (2)$$

Таким образом, необходимо определить признаковое пространство, в котором минимальный набор признаков по  $N$  обеспечил бы максимальную контрастность распознаваемых объектов  $\{Yk\}$  или позволил получить максимальное значение для вектора  $\{Xkl\}$ , характеризующего межклассовое расстояние.

### Основные этапы алгоритма формирования векторов признаков

Согласно [3], наилучшие результаты применительно к анализу сигналов  $S(t)$  дискретной манипуляции дают фреймовые формы вейвлет-преобразования (ВП). Непрерывное ВП есть скалярное произведение  $S(t)$  и базисных вейвлетов:

$$W(f_m, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) f_m^{-1/2} \psi^* \left( \frac{t - \tau}{f_m} \right) dt = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi_{f_m, \tau}^*(t) dt, \quad (3)$$

где  $\Psi^*(t)$  – материнский вейвлет, комплексно сопряженный с  $S(t)$ , из которого процедурами частотного масштабирования и временных сдвигов формируются все базисные функции:

$$\Psi_{f_m, \tau}(t) = f_m^{-1/2} \Psi^* \left( \frac{t - \tau}{f_m} \right), \quad (4)$$

здесь  $\tau$  – сдвиг масштабированного вейвлета вдоль оси времени;  $f_m$  – величина частотного масштаба (аналог частоты в анализе Фурье), которая для фреймовых ВП дискретна, т.е.  $m = 1, \dots, M$ , где  $M$  – число масштабов фреймового ВП.

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

В связи с этим, основные этапы алгоритма формирования признаков сигналов и их последующего распознавания можно определить следующим образом.

1. Определяют  $L \geq 2$  классов распознавания, для которых синтезируют отображающие их эталонные сигналы  $\{S_l\}$ , в виде дискретных отсчетов.
2. На основе фреймового ВП формируют матрицу ВК распределения энергии  $M_l$  для каждого  $l$ -го эталонного сигнала, где  $l = 1, \dots, L$ .
3. Из ВК матрицы  $M_l$  каждого из  $l$ -го эталонного сигнала формируют вектор признаков путем последовательной конкатенации строк матрицы.
4. Дискретные отсчеты реализации распознаваемого сигнала  $\{Y_k\}$  разбивают на фрагменты, длительностью равной длительности эталонных сигналов.
5. Для каждого фрагмента распознаваемого сигнала  $\{Y_k\}$  формируют вектора признаков из ВК, аналогично эталонным сигналам.
6. Формируют вектор признаков распознаваемого сигнала  $\{Y_k\}$  путем усреднения векторов признаков всех фрагментов.
7. Идентифицируют распознаваемый сигнал по результатам выбора наименьшего значения модуля разности между его вектором признаков и векторами признаков каждого эталонного сигнала, в соответствии с выражением (2).

С целью проверки работоспособности разработанного алгоритма был проведен эксперимент по распознаванию сигнала КАМ-64 в признаковом пространстве эталонных сигналов КАМ-16, КАМ-32 и КАМ-64 с близкой частотно-временной структурой. На рис. 3 показаны матрицы ВК эталонных сигналов.

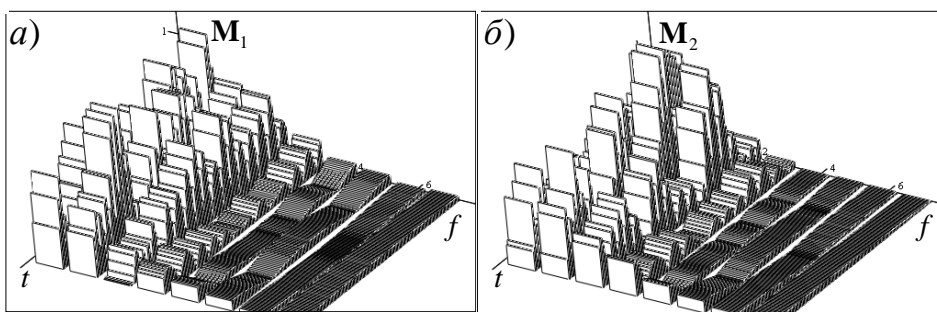


Рис. 3. Матрицы фреймового преобразования эталонных сигналов: КАМ-16 – а); КАМ-64 – б)

Визуальный анализ синтезированных матриц подтверждает утверждение о близости структуры эталонных сигналов на уровне признаковых пространств (рис. 3), что указывает на сложность реализации процедур их распознавания.

В [4] установлено, что качество вектора признаков во многом зависит от информационной компоненты, представляющей совокупность нулей и единиц в модулирующей последовательности. Для минимизации ее влияния на структуру ВК матриц фреймовых ВП на 4 этапе алгоритма, распознаваемую реализацию разбивают на фрагменты, для которых формируют свой вектор признаков. На 6 этапе формируют

вектор признаков обрабатываемой реализации путем усреднения векторов признаков всех фрагментов. В соответствии с 7 этапом, перед процедурой распознавания предварительно рассчитывают модули векторов разности признаков  $\{X_{kl}\}$  между распознаваемым сигналом и эталонными (рис. 4).

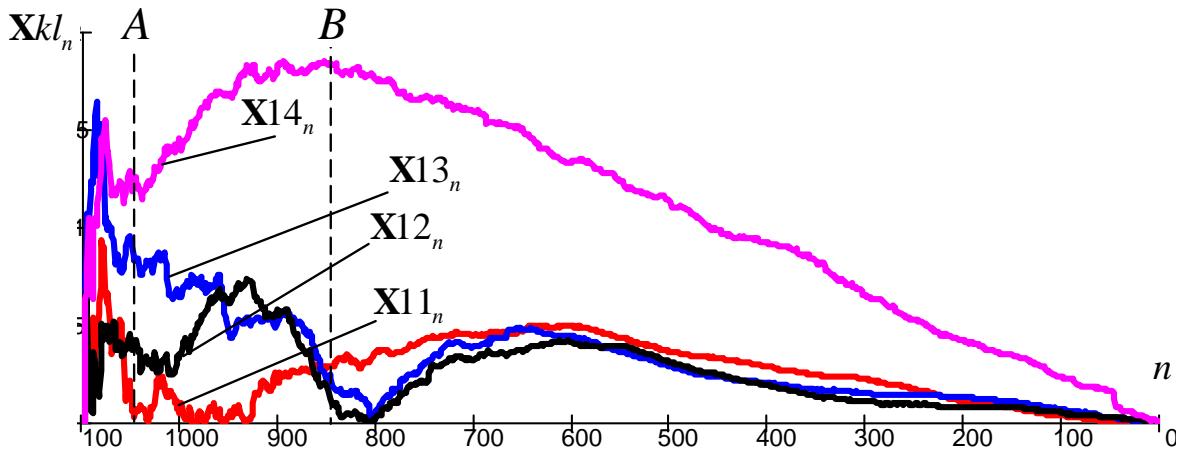


Рис. 4. Модули векторов разности признаков между распознаваемым сигналом КАМ-64 и эталонными: КАМ-64 –  $X_{11}_n$ ; КАМ-16 –  $X_{12}_n$ ; КАМ-32 –  $X_{13}_n$ ; шумом –  $X_{14}_n$

Различные признаки по-разному отражают индивидуальные свойства распознаваемых сигналов (для рассматриваемого случая выделены прерывистыми линиями, обозначенными символами A и B). С целью получения количественной оценки контрастности введем показатель

$$R_{lj} = \frac{\sum_{n=B}^A X_{kl}_n}{\sum_{n=B}^A X_{kj}_n}, \quad (5)$$

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

Чем ближе распознаваемый сигнал к эталону, тем больше результат  $R_{lj}$ . Для рассматриваемого случая, полагая, что  $k = 1$  – распознаваемый сигнал КАМ-64;  $j = 1$  – эталон КАМ-64;  $l = 2$  – КАМ-16;  $l = 3$  – КАМ-32;  $l = 4$  – эталон шума. В табл. 1 представлены результаты зависимости значения показателей контрастности  $R_{21}$ ,  $R_{31}$ ,  $R_{41}$ , рассчитанные согласно (5) от ОСШ.

Таблица 1

Зависимость показателей контрастности от ОСШ

ОСШ, $h^2$ , дБ	12	10	8	6
$R_{21}$	6,3	2,4	1,6	1,2
$R_{31}$	6,4	2,7	1,8	1,3
$R_{41}$	21,8	16,6	12,0	6,8

### Заключение

Анализ полученных данных, показывает, что увеличение интенсивности шумов приводит к тому, что вектор признаков по своей структуре все более становится похожим на вектор реализации шума. Разработанный подход обеспечивает приемлемую контрастность признаков пространств при значениях ОСШ до 6 дБ для сигналов КАМ, имеющих близкую частотно-временную структуру.

## Литература

1. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер: 2002. 458 с.
2. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов. Пер. с англ. М.: Наука. 1979. 368 с.
3. 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. 7–158.
4. Способ распознавания радиосигналов. Патент РФ № 2356064 МПК<sup>7</sup> G 06 K 9/00 от 20.05.2009 г.

### Для цитирования:

*Дворников А.С.* Алгоритм формирования признаков сигналов квадратурной амплитудной модуляции на основе упорядоченных коэффициентов их фреймовых преобразований // *i-methods*. 2014. Т. 6. № 1. С. 14–18.

---

## The algorithm of formation of the signs of the quadrature amplitude modulation signals on the basis of the ordered coefficients of their frame transforms

**Dvornikov A.C.**

Military Academy of communications, St. Petersburg

### Abstract

Offers the algorithm of formation signs for the quadrature modulation signals with close time–frequency structure. Justifies the use of as attributes of recognition of an ordered sequence of the wavelet coefficients of frame transforms. Analyzes the results of computer simulation.

**Keywords:** algorithm; kvadro peak modulation; the ordered factors; frame transformations, radio control system.

### References

1. Sergienko A. B. Digital signal processing. SPb.: Peter: 2002. 458 p.
2. Fukunaga K. Introduction to statistical pattern recognition theory. TRANS. angl. Moscow: Nauka. 1979. 368 p.
3. Dvornikov, A. S., Dvornikov S.V., etc. the Formation characteristics and the detection signals based on the processing of their frame transforms. Information and space. 2011. No. 2. Pp. 7–158.
4. The method of recognition of radio signals. RF patent № 2356064 IPC 7 G 06 K 9/00 from 20.05.2009

### For citation:

Dvornikov A.C. The algorithm of formation of the signs of the quadrature amplitude modulation signals on the basis of the ordered coefficients of their frame transforms // *i-methods*. 2014. Vol. 6. No. 1. Pp. 14–18.