

## МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ПРИЗНАКОВ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ С БЛИЗКОЙ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

*Дворников С.В., д.т.н., Военная академия связи, г. Санкт-Петербург*

*Дворников С.С., Санкт-Петербургский государственный политехнический университет*

*Коноплев М.А., Военная академия связи, г. Санкт-Петербург*

**Ключевые слова:** распознавание сигналов, вектор признаков, симметричные матрицы, признаковые пространства, спектральное разложение матриц.

### Введение

В настоящее время решение проблемы построения автоматов классификации сигналов для систем радиоконтроля является весьма актуальной [1]. Прежде всего, это обусловлено значительным ростом несанкционированных источников, работающих в запрещенных участках диапазона частот. Кроме того, широкое применение передатчиков, построенных на принципах адаптивного выбора текущего номинала рабочей частоты, привело к тому, что длительность излучений в эфире реально порой не превышает нескольких долей секунд. Очевидно, что в таких условиях эффективное функционирование систем радиоконтроля возможно только в автоматическом режиме [2]. В связи с этим, настоящая статья посвящена исследованию возможности разработки метода классификации радиосигналов на фоне шумов высокой интенсивности при ограничениях на длительность обрабатываемой реализации. Полученные теоретические и практические результаты будут интересны специалистам обработки сигналов в области радиотехники, спектрометрии и приборостроения.

### Формализация задачи формирования признаков распознавания сигналов

Как правило, в радиотехнике задача классификации сигналов базируется на элементах теории распознавания образов [3], согласно которой необходимо на основе признаков, сформированных в результате наблюдений за сигналом, представленного ограниченной выборкой, принять решение об отнесении его к одному из альтернативных классов.

В качестве признаков могут рассматриваться как статистические, так и структурные особенности сигналов, которые в своей совокупности определяют признаковые пространства, описывающие распознаваемый объект [4]. Очевидно, чем контрастней признаковые пространства, тем проще реализация процедур принятия решений в процессе классификации сигналов.

Одним из возможных направлений преодоления априорной неопределенности о распознаваемых классах сигналов является предварительное формирование их эталонных образов, поскольку в этом случае задачу

*Предлагается метод формирования признаков радиосигналов с близкой частотно-временной структурой на основе обработки их представлений в виде симметрических матриц. Обобщаются этапы формирования векторов признаков. Приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований, подтверждающих контрастность сформированных признаков пространств. Рассматриваются рекомендации по практической реализации разработанного подхода.*

идентификации можно свести к процедурам сравнения эталонных описаний с признаками обрабатываемой реализации [3, 4]. Для этого необходимо создание базы, содержащей векторы признаков эталонных описаний  $\{\mathbf{X}^{(l)}\}$  по всем  $L$  распознаваемым классам. Здесь  $l = 1, 2, \dots, L$ .

Тогда процесс распознавания можно рассматривать как процедуру сравнения вектора признаков принятой реализации  $\mathbf{X}$  с каждым из  $L$  векторов эталонных описаний  $\mathbf{X}^{(l)}$  [5]. Поскольку различия между классами будут проявляться в абсолютной разнице их векторов признаков, то тогда можно задать правило, согласно которому любым двум классам  $S_i^{(l)}, S_i^{(u)}$  ставится в соответствие вектор

$$\mathbf{D}_q^{lu} = \begin{vmatrix} d_1^{lu} \\ \cdot \\ \cdot \\ d_q^{lu} \end{vmatrix}, \quad (1)$$

состоящий из  $q$  скаляров  $d^{lu}$ , называемых межклассовыми расстояниями, и выражающих степень отличия у этих классов характеристик данных признаков.

С практической точки зрения целесообразно определить условия формирования признаков таким образом, чтобы при минимизации размерности выборки сигнала обеспечивалась максимизация достоверности распознавания. Очевидно, что такие условия сами по себе противоречивы, поэтому уже из этого очевидного факта следует особая значимость процесса формирования признакового пространства.

Первоначальный набор признаков формируется до начала распознавания из числа доступных измерению параметров сигнала  $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_R)$ , отражающих его наиболее существенные для распознавания свойства. На следующем этапе из первоначального набора признаков формируют новый набор

$\tilde{\mathbf{X}} = (\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_I)$ , состоящий из меньшего числа переменных ( $I < R$ ).

Традиционные способы формирования новых признаков в условиях полного априорного знания основаны на максимизации функции  $\mathbf{D}_q^{lu} = J(d_1, d_2, \dots, d_q)$  [6]. Считается, что чем больше расстояние между векторами в признаковом пространстве, тем более описываемые ими классы контрастны [3]. Следовательно, тем легче их разделить и, тем самым, обеспечить требуемую достоверность классификации.

Таким образом, представленный подход к формализации задачи формирования признаков распознавания сигналов позволил определить цель настоящей работы следующим образом. Разработать метод формирования признаков радиосигналов с близкой частотно-временной структурой по кратковременным реализациям, обеспечивающий их распознавание с вероятностью не хуже 0,9 при величине отношения сигнал/шум (ОСШ) 4–5 дБ.

**Формирование признаков пространств сигналов по их временным реализациям**

Операцию линейного преобразования  $\mathbf{A}$  исходного пространства признаков  $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_R)$  в новое пространство  $\tilde{\mathbf{X}} = (\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_I)$  можно представить как

$$\tilde{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X}. \tag{2}$$

Если в качестве столбцов матрицы преобразования  $\mathbf{A}$  определить собственные вектора  $\{\lambda_R\}$  общей ковариационной матрицы  $\mathbf{M}^*$  распознаваемых совокупностей образов, то в этом случае операция (2) будет декоррелирующей, а сама ковариационная матрица примет вид:

$$\mathbf{M}^* = \mathbf{A}^T \mathbf{M} \mathbf{A} = \mathbf{\Lambda} = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_R \end{pmatrix} \tag{3}$$

Преобразование (3) является алгоритмом Карунена – Лозва [3]. В рассматриваемом случае предлагается в качестве исходных данных для формирования признаков пространств использовать дискретные временные отсчеты реализации сигнала  $\mathbf{X} = (s_1, s_2, \dots, s_R)$ .

Реализация рассмотренного подхода стала возможной благодаря свойствам подобия матриц [7], согласно которому произвольная матрица  $\mathbf{V}$  подобна матрице  $\mathbf{W}$  в том случае, если существует невырожденная трансформирующая матрица  $\mathbf{S}$  такая, что:

$$\mathbf{W} = \mathbf{S}^{-1} \mathbf{V} \mathbf{S}. \tag{4}$$

Поскольку никакие матрицы из двух разных классов не являются подобными друг другу, притом, что матрицы из одного класса эквивалентности имеют одинаковые собственные значения, то это свойство можно использовать при формировании признаков пространств различных классов сигналов.

С целью оценки помехоустойчивости добавим к исходной матрице сигнала  $\mathbf{V}_c$  матрицу шумовых коэффициентов  $\mathbf{V}_{ш}$ :

$$\mathbf{V}_{c+ш} = \mathbf{V}_c + \mathbf{V}_{ш}. \tag{5}$$

Далее воспользуемся теоремой о возмущении собственных значений [7], согласно которой собственные значения диагонализуемой матрицы  $\mathbf{V}_c$  и собственные значения возмущенной матрицы  $\mathbf{V}_{c+ш} = \mathbf{V}_c + \mathbf{V}_{ш}$  связаны соотношением:

$$|\hat{\lambda}_i - \lambda_i| \leq \|\mathbf{\Lambda}\| \|\mathbf{\Lambda}^{-1}\| \|\mathbf{V}_{ш}\| = \chi(\mathbf{\Lambda}) \|\mathbf{V}_{ш}\|, \tag{6}$$

где  $\mathbf{V}_{ш}$  – возмущающая матрица шумовых коэффициентов;  $\lambda_i - i$ -е собственное значение матрицы  $\mathbf{V}_c$ ;  $\hat{\lambda}_i - i$ -е собственное значение матрицы  $\mathbf{V}_{c+ш}$ ;  $\mathbf{\Lambda}$  – матрица собственных векторов матрицы  $\mathbf{V}_c$ ;  $\|\cdot\|$  – знак матричной нормы;

$\chi(\mathbf{\Lambda}) = \|\mathbf{\Lambda}\| \|\mathbf{\Lambda}^{-1}\|$  – число обусловленности матрицы  $\mathbf{\Lambda}$ .

Данная теорема определяет верхнюю границу ошибки оценивания собственных значений матрицы  $\mathbf{V}_c$  при воздействии на нее возмущающей шумовой матрицы  $\mathbf{V}_{ш}$ .

Согласно выражению (6) следует, что разброс собственных значений возмущенной матрицы  $\mathbf{V}_{c+ш}$  зависит не только от значений элементов матрицы  $\mathbf{V}_{ш}$ , но и от числа обусловленности  $\chi(\mathbf{\Lambda})$ . Причем, если  $\chi(\mathbf{\Lambda})$  мало (близко к единице), то малые возмущения могут изменить собственные значения. Однако эти изменения будут ограничены величиной того же порядка, которая соответствует этим возмущениям. Если же значение  $\chi(\mathbf{\Lambda})$  велико, то малые возмущения приводят к сравнительно большим изменениям собственных значений.

Экспериментально в [8] установлено, что после нормирования матрицы ее несколько первых собственных значений (наибольших по отношению к остальным) имеют порядок от единиц и десятков. Следовательно, если число обусловленности мало, то воздействие возмущающей матрицы не окажет существенного влияния на первые наибольшие собственные значения матрицы  $\mathbf{V}_c$ . Поскольку значение  $\chi(\mathbf{\Lambda}) = 1$  имеют только унитарные матрицы, то необходимо матрицу собственных векторов  $\mathbf{\Lambda}$  привести к унитарному виду. В то же время унитарной матрицей собственных векторов обладают только нормальные матрицы, в частности, эрмитовы и симметрические матрицы [7, 8].

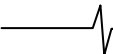
Наиболее простым способом получения симметрической матрицы из исходного вектора признаков является вычисление автокорреляционной матрицы  $\mathbf{V}$  [7]:

$$\mathbf{V} = \mathbf{X} \mathbf{X}^T, \tag{7}$$

где  $\mathbf{X}$  и  $\mathbf{X}^T$  – соответственно входной вектор признаков и его транспонированная копия.

Таким образом, в качестве первичного признакового пространства целесообразно использовать собственные значения симметрических матриц, в основе которых лежат временные отсчеты сигналов. И затем, из них уже формировать векторы признаков, причем в качестве их элементов выбирать собственные значения, наиболее устойчивые к возмущающему воздействию шумов. Рассмотренный подход позволил разработать метод формирования признаков пространств сигналов по их временным реализациям, состоящий из следующих этапов.

На первом этапе определяется перечень распознаваемых классов и формируются соответствующие им эталонные сигналы путем их синтеза на основе генера-



тора или подбора из имеющихся образцов. Причем для каждого класса формируются эталонные сигналы при различной величине ОСШ.

На втором этапе определяется длина обрабатываемой реализации. С одной стороны, чем она больше, тем более точно формируемые признаки характеризуют распознаваемый сигнал. С другой стороны, увеличение длины неизбежно ведет к увеличению объема выполнения требуемых вычислений. Целесообразно длину реализации выбирать из расчета использования всех ее отсчетов при реализации процедур последующего преобразования Фурье.

На третьем этапе выполняются процедуры преобразования Фурье над временными реализациями эталонных сигналов.

На четвертом этапе из спектральных отсчетов эталонных сигналов формируются симметрические матрицы, для которых затем рассчитываются собственные значения.

На пятом этапе для каждого из классов определяются наиболее помехоустойчивые собственные значения.

На шестом этапе для каждого класса эталонных сигналов формируются векторы признаков, путем соответствующего упорядочения наиболее помехоустойчивых собственных значений.

На седьмом этапе формируется вектор признаков для распознаваемого сигнала. При этом длина его выборки должна соответствовать длине реализаций эталонных сигналов, а в качестве помехоустойчивых собственных значений выбираются только те, которые были определены на шестом этапе.

Очевидно, что в практических алгоритмах реализация каждого из этапов могут быть свои особенности, но при этом общая структура и последовательность их выполнения будет сохраняться.

### Результаты практического эксперимента

В интересах проверки теоретических положений был проведен эксперимент по распознаванию сигналов с близкой частотно-временной структурой.

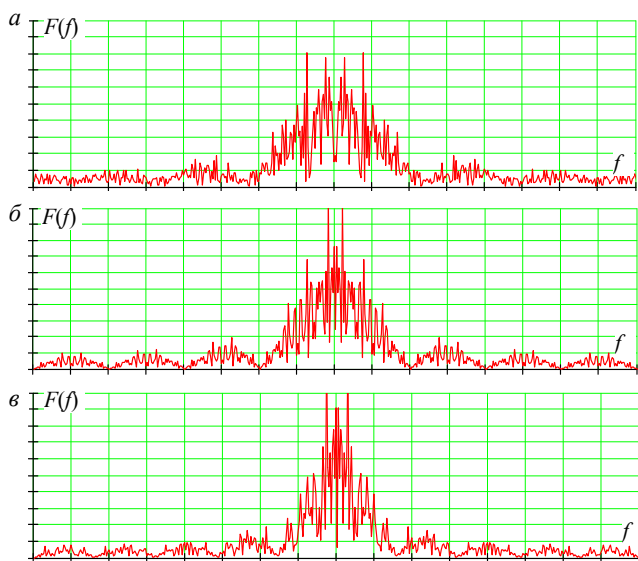


Рис. 1. Спектры сигналов: а – ФТ 600 бод; б – ФТ 500 бод; в – ФТ 400 бод

В качестве альтернативных классов рассматривались радиосигналы фазовой манипуляции (ФТ) со скоростями 600, 550, 500, 450 и 400 бод. На рис. 1 для примера изображены модули спектров сигналов ФТ 600, 500 и 400 бод. Следует заметить, что классифицировать рассматриваемые тестовые сигналы только по форме их спектра весьма затруднительно.

Учитывая, что спектральные представления сигналов  $F(f)$ , полученные на основе преобразования Фурье, сами по себе являются декоррелирующими преобразованиями, то в качестве исходных данных при формировании матриц  $\mathbf{V}$  были выбраны амплитудные значения функции  $F(f)$ . Такой подход позволил снизить негативное влияние информационных составляющих сигналов на формируемые признаки.

Поскольку матрица  $\mathbf{V}$  каждого из сигналов является симметрической, то ее наполнение для дискретной функции спектрального представления длительностью  $N$  отсчетов будет осуществляться в соответствии с выражением:

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} f_1 & f_2 & f_3 & \dots & f_{N-1} & f_N \\ f_2 & f_3 & \dots & f_{N-1} & f_N & f_1 \\ f_3 & \dots & f_{N-1} & f_N & f_1 & f_2 \\ f_4 & \dots & f_N & f_1 & f_2 & f_3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_N & f_1 & f_2 & f_3 & \dots & f_{N-1} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Для рассматриваемого подхода в качестве первичного вектора признаков  $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$  выступали собственные значения каждой из матриц  $\mathbf{V}$ . Затем с целью снижения размерности векторов  $\mathbf{X}$ , в соответствии с выражением (6), были отобраны собственные значения матриц  $\mathbf{V}$ , наиболее устойчивые к воздействию шумов. Для этого синтезировались тестовые радиосигналы при различных величинах ОСШ и рассчитывались собственные значения их симметрических матриц  $\{\lambda_N\}$ . Затем вычислялась функция разброса собственных значений  ${}^l Y_n$  для каждого из  $l = 1, 2, \dots, L$  распознаваемых классов сигналов по формуле:

$${}^l Y_n = \frac{|\{\lambda_N\}_{\min} - \{\lambda_N\}_{\max}|}{{}^l \{\lambda_N\}_{\min}}, \quad (9)$$

где  $\{\lambda_N\}_{\min}$ ,  $\{\lambda_N\}_{\max}$  – собственные значения симметрической матрицы  $l$ -го класса распознаваемого радиосигнала, соответственно при минимальном и максимальной величине заданного ОСШ.

После этого вычисленный разброс  ${}^l Y_n$  сравнивался с предварительно заданным порогом  $G$ . Устойчивыми значениями считались те, величина которых удовлетворяла равенству

$${}^l Y_n < G \quad (10)$$

Так как каждый из  $l$ -радиосигналов имеет свое количество устойчивых значений, то для формирования векторов признаков было определено число  $M$ , соответствующее функции разброса  ${}^l Y_n$ , у которой число элементов, удовлетворяющих условию (10), оказалось наименьшим (в эксперименте оно соответствует сигналу

ФТ 400 бод). При этом учитывалось, что порядковые номера, используемые для формирования векторов признаков, соответствовали значениям функций  ${}^l Y_n$ , удовлетворяющих условию (10) для каждого из рассматриваемых сигналов.

Так, на рис. 2 показаны модули собственных значений радиосигнала ФТ 400 бод при ОСШ 15 и 5 дБ, а на рис. 3 изображена функция разброса  ${}^l Y_n$  собственных значений для указанного радиосигнала с нанесенным порогом  $G$  (в эксперименте  $G$  определено по уровню 0,5 функции  ${}^l Y_n$ ).

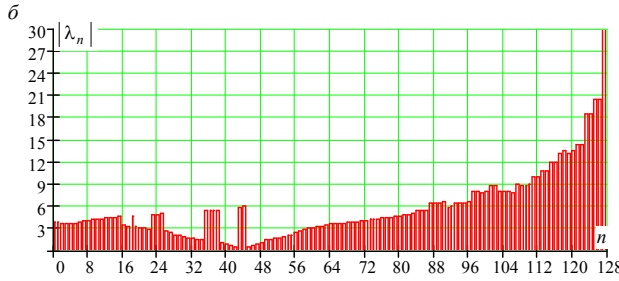
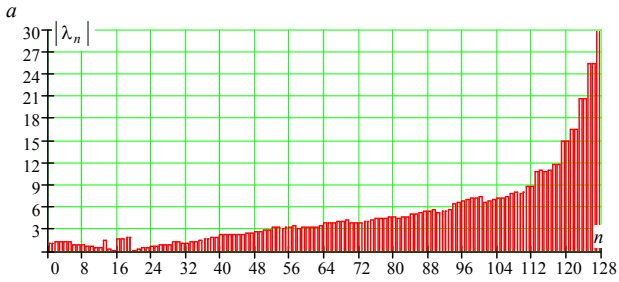


Рис. 2. Модули собственных значений сигнала ФТ 400 бод при ОСШ: 15 дБ – а); 5 дБ – б)

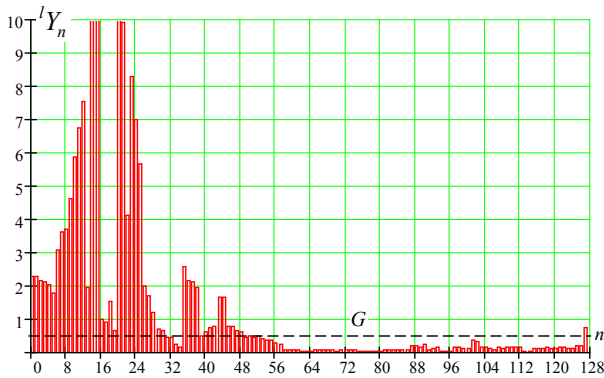


Рис. 3. Функция разброса собственных значений сигнала ФТ 400 бод при ОСШ 15 и 5 дБ

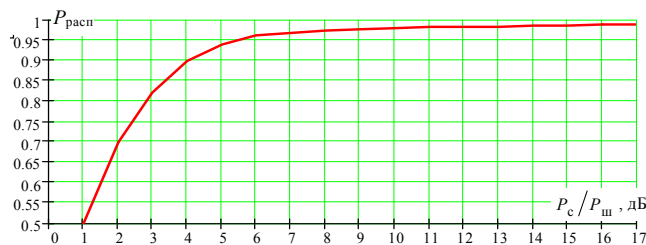


Рис. 4. Зависимость вероятности распознавания от ОСШ

Окончательное решение об отнесении распознаваемого радиосигнала к одному из альтернативных классов осуществлялось согласно критерию

$$\min \left\{ \sum_{l=1}^L \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left\| {}^l \lambda_n - {}^s \lambda_n \right\| \right\}, \quad (11)$$

где  ${}^l \lambda_n$  – собственные значения, являющиеся признаками эталонов;  $L$  – количество эталонов (в эксперименте 5);  ${}^s \lambda_n$  – собственные значения, являющиеся признаками распознаваемого сигнала.

Вероятность правильного распознавания  $P_{расп}$  оценивалась методом Монте-Карло по 200 выборкам для каждого распознаваемого сигнала при ОСШ  $P_c/P_{ш}$  в диапазоне от 0 до 20 дБ (рис. 4).

### Заключение

Разработанный подход расширяет возможности существующих методов распознавания сигналов радиотехнических систем. В частности, одно из его применений видится в приложении практических задач масс-спектрометрии и хроматографии. Между тем следует признать, что вопрос поиска оптимального решения при построении автоматов классификации радиосигналов все еще остается открытым. Так, в [6] предложены методы распознавания на основе билинейных форм представления радиосигналов, поэтому дальнейшую работу, по мнению авторов, следует вести именно в этом направлении.

### Литература

1. Дворников С. В. Проблема поиска сигналов источников информации при радиомониторинге // Мобильные системы. – 2007. – № 4. – С. 33–36.
2. Каргашин В. Л. Проблемы обнаружения и идентификации радиосигналов средств негласного контроля // Специальная техника. – 2000. № 3–5.
3. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов / Пер. с англ.; Под ред. М. А. Айзермана. – М.: Наука, 1977. – 319 с.
4. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов: Пер. с англ. / Под ред. Ю. И. Журавлева. – М.: Мир, 1978.
5. Дворников С. В., Сауков А. М. Метод распознавания радиосигналов на основе вейвлет-пакетов // Научное приборостроение. – 2004. – Т. 14. – № 4. – С. 85–93.
6. Дворников С. В., Алексеева Т. Е. Распределение Алексеева и его применение в задачах частотно-временной обработки сигналов // Информация и Космос. – 2006. – № 3. – С. 9–21.
7. Хорн Р., Джонсон Ч. Матричный анализ: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989.
8. Сауков А. М., Симонов А. Н., Мотков В. И. Способ распознавания радиосигналов. Патент РФ № 2231118 МПК7 G 06 К 9/00 от 20.06.04 г.

## THE METHOD OF PATTERN RECOGNITION TO DETECT RADIO SIGNALS WITH A SIMILAR TIME-FREQUENCY STRUCTURE

*Dvornikov S.V., Dvornikov S.S., Konoplev M.A.*

A method of forming signs of radio signals with similar time-frequency-time structure on the basis of processing of their submissions in the form of symmetric matrices. Substantiated stages of formation of feature vectors. The results of theoretical and experimental studies confirming the contrast formed attribute spaces. Consider recommendations for the practical implementation of the developed approach.