

КЛАССИФИКАТОР РАДИОСИГНАЛОВ ВЧ ДИАПАЗОНА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ РАДИОЧАСТОТНОГО МОНИТОРИНГА

В.М. БЕЗРУК, А.В. ЧЕБОТОВ

Рассмотрены алгоритмы автоматического распознавания ВЧ сигналов. Описывается практическая реализация классификатора сигналов, в котором используются наряду со спектральными признаками, индивидуальные параметрические признаки. Это обеспечивает приемлемое качество распознавания радиосигналов ВЧ диапазона. Приводятся результаты исследований вероятностных характеристик классификатора для реальных сигналов.

The algorithms of automatic recognition of HF signals are considered. The practical realization of signals classifier in which is used not only spectral tags but and individual parametric tags is described. It allows providing reasonable quality of the recognition of the HF signals. The outcomes of researches of the probability characteristics of the classifier for real signals are given.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях большой загрузки источниками радиоизлучений ВЧ диапазона (3–30 МГц) для проведения автоматизированного радиочастотного мониторинга актуально применение статистических методов распознавания сигналов [1–6] с целью получения данных о радиоэлектронной обстановке в эфире. Одним из современных средств радиоконтроля, играющим важную роль в системах радиочастотного мониторинга, являются автоматические классификаторы сигналов.

Процесс классификации радиосигналов при автоматизированном радиоконтроле ВЧ диапазона можно разделить по двум направлениям:

1) распознавание априорно известных видов радиопередач с предварительным «обучением», в результате которого формируются устойчивые статистические признаки и оцениваются параметры решающего правила по представительной выборке сигналов;

2) классификация видов радиопередач, которая базируется на определении типа и параметров модуляции (скорости телеграфирования, индекса модуляции, девиации частоты и др.), способа синхронизации и кодирования информации.

Для обоих случаев формирование информативных признаков, по которым осуществляется классификация радиосигналов, может производиться в результате частотно-временного анализа сигналов с использованием методов вычисления дискретного преобразования Фурье (ДПФ). В пространстве сформированных спектральных признаков выполняется распознавание с помощью специальных решающих правил, учитывающих вероятностные свойства реальных радиосигналов. На основе предложенных алгоритмов распознавания создан классификатор радиосигналов ВЧ диапазона.

В данной статье рассматриваются алгоритмы распознавания заданных видов радиопередач, а также результаты исследований созданного классификатора радиосигналов, проведенных при его испытаниях на реальных сигналах.

1. АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ ЗАДАНЫХ ВИДОВ РАДИОПЕРЕДАЧ

В качестве исходного описания распознаваемых радиоизлучений при автоматизированном радиоконтроле можно использовать спектральное представление соответствующих им радиосигналов, получаемых с выхода линейной части радиоприемника. В работах [2, 3, 6] приведены разные спектральные методы выявления и распознавания сигналов, которые могут быть использованы при радиоконтроле. В частности, в работе [6] приведено описание способов построения информативных признаков и алгоритмов распознавания радиосигналов, учитывающих особенности реального эфира ВЧ диапазона. Данные алгоритмы базируются на формировании индивидуальных параметрических признаков и построении собственных областей для M заданных радиосигналов из условия обеспечения заданных вероятностей правильного их распознавания P_{pi} , $i = 1, M$. Алгоритмы распознавания предполагают отнесение наблюдений либо к одному из M заданных классов радиосигналов, либо к $M + 1$ -му классу неизвестных сигналов.

В результате исследований разных практических подходов к решению задачи распознавания радиопередач при автоматизированном радиоконтроле предложено дальнейшее развитие алгоритмов распознавания [6], использующих спектральные (FFT) признаки как наиболее устойчивые к искажениям радиосигналов в ВЧ диапазоне. Эти алгоритмы распознавания реализованы в классификаторе радиосигналов ВЧ диапазона.

Ниже приводятся некоторые практические особенности алгоритмов распознавания радиопередач при проведении автоматизированного радиоконтроля.

Распознавание вида радиопередачи осуществляется в два этапа:

I-й этап – проверка гипотезы о принадлежности спектральных признаков радиосигнала к одной из собственных областей классов, построенных на этапе «обучения» классификатора.

II-й этап – проверка соответствия индивидуальных признаков радиосигнала для наиболее правдоподобных классов, прошедших I-й этап распознавания, и выбор одного из них.

Параметры «обучения» классификатора оптимизировались из условия, что на I-м этапе алгоритма распознавания достигается максимум вероятности правильного распознавания радиопередач, а на II-м этапе – минимизировалась заданная вероятность «ложных тревог», то есть вероятность ошибочного отнесения неизвестных радиопередач к заданным классам.

В созданном классификаторе распознавание вида радиопередачи на I-м этапе производится по $N = 100$ компонентам усредненного амплитудного спектра, сформированного на интервале наблюдения сигналов:

$$T_p = \frac{N_p N_{FFT}}{F_S}, \quad (1)$$

где N_p – количество реализаций сигнала, для которых выполнялось дискретное преобразование Фурье (ДПФ) без «перекрывтия» реализаций; N_{FFT} – количество пар отсчетов комплексной огибающей сигналов (КОС), по которым производится вычисление ДПФ (выбрано $N_{FFT} = 256$); F_S – частота следования пар отсчетов КОС (выбрано $F_S = 11,025$ кГц).

Интервал наблюдения T_p задавался путем выбора количества реализаций сигналов N_p , исходя из заданной скорости поступления на распознавание потока выявленных радиоизлучений в заданном диапазоне частот V_S (излучений в минуту):

$$T_p = \frac{60}{V_S}. \quad (2)$$

Алфавит радиопередач условно разбит на две группы, отличающихся минимально необходимым временем наблюдения, при котором обеспечивается приемлемое качество распознавания:

для *I-й группы* $T_{pmin} \geq 186$ мс ($N_p = 8$ реализаций),

для *II-й группы* $T_{pmin} \geq 744$ мс ($N_p = 32$ реализации).

К *I-й группе* радиопередач ВЧ диапазона относятся такие радиопередачи, как одноканальная телеграфия с ЧМ2 и скоростью передачи данных более 100Бод, многопозиционная ЧМ телеграфия, многоканальная ЧМ (ФМ) телеграфия, цифровая телефония и др., спектральный «образ» которых устойчиво формируется за время, равное T_{pmin} .

Ко *II-й группе* радиопередач относятся «ручная» телеграфия кодом Морзе, аналоговая телефония (модуляция АМ, ОБП), многоканальная телеграфия магистральных линий связи с большими селективными «замираниями» участков спектра сигнала и др.

Согласно алгоритму распознавания радиопередач вначале формируется спектральное описание в виде совокупности компонентов амплитудного спектра $X_i[k]$ сигнала и их усреднения по N_p реализациям:

$$\bar{X}[k] = \sum_{r=1}^{N_p} \frac{X_r[k]}{N_p}, \quad k = \overline{1, N}. \quad (3)$$

Далее осуществляется отбор информативных компонентов усредненного спектра $\bar{X}[k]$ по следующему правилу:

$$\left\{ \begin{array}{l} X_N[k] < \Lambda, \Rightarrow \bar{X}[k] = 0; \\ X_N[k] \geq \Lambda, \Rightarrow \bar{X}[k] = X_N[k] \end{array} \right\}, \quad (4)$$

где $X_N[k] = \frac{\bar{X}[k]}{X_{max}}$ – компоненты нормированного спектра; X_{max} – максимальный компонент усредненного спектра $\bar{X}[k]$; Λ – некоторое пороговое значение, соответствующее соотношению сигнал/шум, при котором сохраняется приемлемое качество распознавания (например, для соотношения сигнал/шум = 10 дБ выбиралось значение $\Lambda = 0,125$).

Затем вычисляются коэффициент вариальности энергии сигнала K_{var} на интервале наблюдения из N_p реализаций сигнала:

$$K_{var} = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{min}}, \quad (5)$$

где E_{min} , E_{max} – минимальные и максимальные значения из ряда выборочных значений, полученных по N_p реализациям сигнала из K отсчетов:

$$E_r = \sum_{k=1}^K X_r^2[k], \quad r = \overline{1, N_p}; \quad (6)$$

E_x – энергия нормированного спектра сигнала, определяемого согласно соотношению:

$$E_x = \sum_{k=0}^{K-1} X_N^2[k]. \quad (7)$$

Наблюдение за параметрами сигналов K_{var} , E_x для реальных радиопередач при радиоконтроле позволило условно их разделить на четыре больших класса (табл. 1), что, в свою очередь, существенно сокращает число проверяемых альтернатив при распознавании сигналов.

Далее при распознавании производится вычисление $2(S+1)$ отсчетов функции когерентности $C^i[j]$ для каждой i -й спектральной копии сигнала и спектральных копий классов I-й группы:

$$C^i[j] = \frac{\sum_{k=0}^{K-1} X[k] \cdot Y^i[k-j]}{\sqrt{E_x E_y^i}}, \quad (8)$$

где i – индекс класса эталонной спектральной копии; $j = -S \dots S$ – индекс допустимой частотной расстройки (выбиралось значение $S = 40$); $X[k]$ – компоненты нормированного спектра распознаваемого радиосигнала; $Y^i[k]$ – компоненты спектра эталонной копии i -го класса I-й группы; E_y^i – энергия нормированного спектра эталонной копии i -го класса.

Таблица 1

Наименование класса сигналов	Значение параметра	
	K_{var}	E_x
Непрерывно-узкополосные	0 – 3.2	1.2 – 5.0
Импульсно-узкополосные	2.5 – 50	1.2 – 5.0
Непрерывно-широкополосные	0 – 1.6	4.5 – 35
Импульсно-широкополосные	3.0 – 50	4.0 – 25

После нахождения максимальных значений C_{max}^i из $2(S+1)$ отсчетов функции когерентности $C^i[j]$ по каждому i -му классу, ранжирования значений C_{max}^i и отбора номеров трех классов с наибольшими C_{max}^i производится проверка гипотез для данных классов на принадлежность оцениваемых параметров для наблюдаемого сигнала соответствующим собственным областям классов:

$$(K_{\text{var}}, E_x, C_{\text{max}}) \in \Phi(K_{\text{var}}^i, E_{xx}^i, C_{\text{max}}^i), i = \overline{1, M}. \quad (9)$$

Границы собственных областей классов формируются на этапе «обучения» путем оценивания закона распределения значений коэффициента вариабельности, энергии нормированного спектра и когерентности $(K_{\text{var}}, E_x, C_{\text{max}})$, полученных по реализациям обучающих выборок сигналов для всех классов радиопередач, которые входят в алфавит классификатора.

Границы собственных областей классов оптимизировались на этапе «обучения», исходя из условия достижения максимума вероятностей правильного распознавания радиопередач. Минимизация вероятностей «ложных тревог» обеспечивается правильным выбором индивидуальных признаков радиопередачи.

Проверка наличия индивидуальных признаков для наиболее правдоподобных классов радиопередач, удовлетворивших граничным условиям (9), представляет собой II-й этап распознавания видов передач и выполняется отдельно для каждого класса (группы классов).

В реализованном классификаторе, если сигнал не был отнесен ни к одному из трех классов I-й группы радиопередач, то осуществляется переход к уточнению результатов распознавания. При этом продолжается наблюдение сигнала до получения N_{p2} реализаций амплитудного спектра. После чего, аналогичным образом производится усреднение (3), нормирование и пороговая обработка компонентов спектра (4), вычисление параметров K_{var} (5), E_x (7) и C_{max}^i (8) с

последовательной проверкой классов I-й и II-й групп на принадлежность собственным областям (9) и на наличие индивидуальных признаков радиопередач.

Если сигнал не был отнесен ни к одному из классов I-й и II-й групп, то осуществляется уточнение результата распознавания с целью идентификации шума или сигнала из $M+1$ -го класса, который в заданный алфавит радиопередач не входит.

Приведем примеры индивидуальных признаков для ряда радиопередач, часто встречаемых в ВЧ диапазоне. В частности, информативным индивидуальным признаком для класса одноканальных передач с 2-позиционной частотной манипуляцией является, декорреляция компонентов динамического спектра, соответствующих частотам манипуляции («нажатия» F_+ и «отжатия» F_-).

Индивидуальными признаками ЧМ-передач также могут быть: длительность элементарной посылки τ , значение сдвига частот ΔF , режим синхронизации (старт-стопная, синхронная), значность кода (5- или 7-элементный код для старт-стопной передачи), структура конструкции блочного кода (для синхронной передачи) и т. д.

В качестве индивидуальных признаков для речевых радиопередач однополосной телефонии служат суммарные составляющие энергии и коэффициенты корреляции формант сигнала, вычисленных на 4-х участках спектра шириной по 600...800 Гц.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ КЛАССИФИКАТОРА НА РЕАЛЬНЫХ СИГНАЛАХ ВЧ ДИАПАЗОНА

Предложенные алгоритмы распознавания радиопередач реализованы в классификаторе, который включает антенный коммутатор, профессиональный радиоприемник Р-309А и компьютер, оснащенный DSP-модулем и выполняющий оцифровку сигнала, формирование комплексной огибающей, вычисление дискретного преобразование Фурье и спектральных информативных признаков сигналов, а также реализующий решающие правила распознавания радиопередач. Проведены исследования классификатора на реальных радиосигналах, характерных для решения задач автоматизированного радиоконтроля.

Поток команд на распознавание поступал по локальной сети автоматически от системы обнаружения «новых» радиопередач на фоне действующих радиоизлучений в диапазоне частот 4–10 МГц. Компьютер классификатора принимал команды обнаружителя, настраивал радиоприемник на распознаваемое радиоизлучение и подключал вход радиоприемника к одной из восьми антенн, имеющих направленные свойства. Поток заявок от системы обнаружения и результаты распознавания регистрировались на жесткий диск синхронно с реализациями сигналов, по которым проводилось распознавание.

Перед началом обработки сигнала в классификаторе производились выбор направления приема на обнаруженный сигнал, настройка частоты радиоприемника, выбор полосы пропускания частот (в зависимости от ширины спектра обнаруженного радиоизлучения), а также установка оптимального коэффициента передачи в трактах РПУ для согласования динамического диапазона АЦП DSP-модуля с уровнем входного сигнала.

Алфавит классификатора представлен 23 классами радиопередач ВЧ диапазона (табл. 2). Объемы выборок N для статистических испытаний составляли от 100 до 300 реализаций по каждому виду радиопередачи, причем сигналы подавались от различных источников с частотной расстройкой в пределах ± 1 кГц.

Итоговые результаты исследования классификатора радиосигналов ВЧ диапазона представлены в табл. 2.

Таблица 2

	Параметры радиопередачи	$P_{\text{пр}}$	$P_{\text{лт}}$
1	ЧМ2-500Гц/200 Бод	0.91	0.07
2	ОФМ2-250 Бод	0.99	0
3	ЧМ2-800Гц/96 Бод	0.99	0.01
4	ОФМ8-2400 Бод	0.98	0.01
5	ЧМ2-150Гц/100 Бод	1.0	0
6	ЧМ2-800Гц/300 Бод	0.93	0.07
7	ЧМ2-600Гц/100 Бод	1.0	0
8	ЧМ2-600Гц/200 Бод	0.91	0.09
9	МНК-8 каналов, $dF=250$ Гц ОФМ2-62.5 Бод	0.9	0
10	ЧМ2-360Гц/300 Бод	1.0	0
11	ЧМ2-250Гц/125 Бод	0.91	0.02
12	МНК-16 каналов, $dF=112.5$ Гц, ОФМ4-75 Бод	0.84	0.04
13	МНК-12 каналов, $dF=200$ Гц, ОФМ2-120 Бод	0.87	0
14	ЧМ2-200Гц/200 Бод	0.87	0.06
15	МНК- 2 канала, $dF=200$ Гц, ОФМ2-100 Бод	0.85	0.03
16	ЧМ2-170Гц/100 Бод	0.89	0.02
17	ЧМ2-200Гц/300 Бод	0.78	0.1
18	ЧМ2-800Гц/150 Бод	0.9	0.1
19	ЧМ2-600Гц/50 Бод	1.0	0
20	ЧМ2-800Гц/200 Бод	0.99	0.01
21	Однополосная телефония	0.77	0.05
22	Амплитудная телефония	0.9	0.06
23	Амплитудная телеграфия кодом Морзе	0.8	0.02

Здесь приведены оценки вероятностей правильного распознавания заданных радиопередач

$P_{\text{пр}} = \frac{n_{\text{пр}}}{N}$ и вероятностей «ложных тревог» $P_{\text{лт}} = \frac{n_{\text{лт}}}{N}$ (ошибочного отнесение неизвестных радиосигналов из $M + 1$ -го класса к заданным радиопередачам).

Время распознавания с учетом интервала наблюдения сигнала было от 0.5 с до 1.3 с в зависимости от источника сигнала, т. е. принадлежности его к I-й или II-й группе радиопередач).

ВЫВОДЫ

Приведены описания алгоритмов работы и результаты испытаний созданного классификатора на реальных радиосигналах, типичных для автоматизированного радиоконтроля ВЧ диапазона. Получены приемлемые для практических задач радиоконтроля результаты распознавания: средняя вероятность правильного распознавания радиопередач не менее 0.85 при средней вероятности «ложных тревог» не более 0.05.

Следует продолжить исследования по комплексному решению задач распознавания и классификации совместно с пространственной селекцией радиосигналов для уменьшения влияния станционных радиопомех от других источников излучений.

Литература. 1. Справочник по радиоконтролю / Под ред. Ж. Жордена. — Женева: Международный союз электросвязи, 1995. — 442 с. 2. *Омельченко В.А.* Основы спектральной теории распознавания сигналов. — Харьков: Вища школа, 1983. — 156 с. 3. *Омельченко В.А., Балабанов В.В., Безрук В.М.* Многокритериальная задача обнаружения неизвестных случайных сигналов спектральным методом // Радиотехника, 2001. — Вып. 121. — С. 27–34. 4. *Омельченко В.А., Безрук В.М., Коваленко Н.П.* Распознавание заданных радиосигналов при наличии неизвестных сигналов на основе авторегрессионной модели // Радиотехника, 2001. — Вып. 121. — С. 27–34. 5. *Безрук В.М., Евсеев К.К., Чеботов А.В.* Метод распознавания видов модуляции радиосигналов, описываемых вероятностной моделью в виде смеси распределений // Прикладная радиоэлектроника, 2003. — №1. — С. 26–31. 6. *Балабанов В.В., Чеботов А.В.* Выбор признаков в задаче распознавания сигналов // Вероятностные модели и обработка случайных сигналов и полей. — Киев: УМКВО, 1991. — С. 171–182.

Поступила в редколлегию 15.08.05

Безрук Валерий Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры сетей связи Харьковского национального университета радиоэлектроники. Область научных интересов: моделирование и многокритериальная оптимизация систем распознавания сигналов.



Чеботов Александр Владимирович, технический директор НТЦ РТС Академии Наук Прикладной Радиоэлектроники. Область научных интересов: цифровая обработка сигналов в задачах проектирования автоматизированных комплексов радиоконтроля.

