

РАСПОЗНАВАНИЕ ЗАДАННЫХ РАДИОСИГНАЛОВ ПРИ НАЛИЧИИ НЕИЗВЕСТНЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ АВТОРЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ

С учетом постоянного усложнения радиоэлектронной обстановки в настоящее время актуальным является оперативный контроль радиочастотного ресурса, который проводится автоматизированными комплексами радиоконтроля (РК) [1,2]. Одной из важных задач РК является распознавание радиосигналов. Вид алгоритмов распознавания и их показатели качества во многом определяются вероятностной моделью, которая используется для описания реальных сигналов [3,4]. При решении задач автоматизированного радиоконтроля широко применяется модель сигналов в виде ортогональных разложений, которая приводит к спектральным алгоритмам распознавания сигналов в выбранном для анализа радиоканале [3]. К настоящему времени в ряде прикладных задач находит широкое применение авторегрессионная модель сигналов, которая при определенных условиях обладает преимуществом по разрешающей способности спектрального представления сигналов [5].

В данной работе исследуются возможности решения задачи распознавания заданных радиосигналов при наличии неизвестных сигналов с применением алгоритмов распознавания, основанных на авторегрессионной модели сигналов. Проведены сравнительные исследования авторегрессионного алгоритма распознавания с одним из известных спектральных алгоритмов распознавания сигналов [3]. Сравнение алгоритмов распознавания выполнено методом статистического моделирования на выборках модельных радиосигналов, характерных для задачи радиоконтроля.

Представление сигналов авторегрессионной моделью

Частным случаем описания линейных случайных процессов с дискретным временем является вероятностная модель в виде авторегрессионного (АР) процесса, который рассматривается в рамках корреляционной теории. Эта модель довольно широко используется для представления случайных процессов с дискретным временем и описывается рекуррентным уравнением [4,5]

$$x_l = a_1 x_{l-1} + a_2 x_{l-2} + \dots + a_p x_{l-p} + \sigma^2 v_l, \quad l = \overline{1, L},$$

где x_l , σ – дискретные отсчеты и дисперсия описываемого процесса; v_l – отсчеты порождающего процесса в виде белого шума с единичной дисперсией; a_p, p – параметры и порядок АР модели; L – длина последовательности.

АР-модель может быть использована для описания реальных сигналов с энергетическим спектром, характеризующимся наличием ярко выраженных экстремумов, число которых определяет порядок этой модели. Поэтому представление АР моделью удобно применять для описания весьма широкого класса радиосигналов, характерных для задач радиоконтроля.

Известны аналитические выражения для многомерных плотностей вероятности гауссовских авторегрессионных случайных процессов, полученные через параметры АР модели [5]. В частности, при выполнении условия $L > p$ получено следующее выражение многомерной плотности вероятности:

$$W(\bar{X}) = \frac{1}{(2\pi)^{L/2} \sigma^{L-p}} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{l=p+1}^L \left[x_l - \mu - \sum_{j=1}^p a_j (x_l - \mu) \right]^2 \right\} \quad (1)$$

где μ – математическое ожидание случайного процесса.

Для многих практических задач порядок модели процессов p оказывается небольшим (единицы, десятки) при длине последовательности L , достигающей сотен и даже тысяч. Это позволяет получить «экономное» описание сигналов с точки зрения реализационных затрат.

Алгоритм распознавания сигналов. Задача распознавания сигналов формулируется следующим образом [3,6]. Распознаванию подлежат M заданных радиосигналов с дискретным временем $\bar{X}^i = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_L^i)$, предъявляемых с вероятностями $P_i, i = \overline{1, M}$. Существует параметрическая априорная неопределенность относительно плотностей распределений сигналов, однако могут быть получены их обучающие выборки реализаций $\bar{X}_r^i, r = \overline{1, n_i}, i = \overline{1, M}$. Кроме заданных радиосигна-

лов на распознавание могут поступать неизвестные сигналы из $M+1$ -го класса, для которых не представляется возможным получить обучающие выборки реализаций.

Общий вид алгоритма распознавания сигналов для решения такой нетрадиционной задачи распознавания сигналов приведен в работах [3,6]. При использовании АР моделей для описания реальных сигналов общий вид решающего правила распознавания конкретизируется с учетом соответствующих выражений для плотности вероятности. В частности, для случая (1) решающее правило определяется следующими соотношениями:

$$H^i: K_k(\bar{x}) \leq A_k, \quad k = \overline{1, M}, \quad (2a)$$

$$K_k(\bar{x}) - K_i(\bar{x}) + \ln \frac{(2\pi\sigma_i)^{p_i-L}}{(2\pi\sigma_k)^{p_k-L}} \geq \ln \frac{P_k}{P_i}, \quad (2б)$$

$$H^{M+1}: K_k(\bar{x}) > A_k, \quad k = \overline{1, M}. \quad (2в)$$

Здесь $K_k(\bar{x}) = \frac{1}{2\sigma_k^2} \cdot \sum_{l=p+1}^L \left[x_l - \mu_k - \sum_{j=1}^{p_k} a_j^k (x_{l-j} - \mu_k) \right]^2$; $A_k = \ln \frac{(2\pi)^{\frac{L}{2}} \sigma_k^{L-p_k} \lambda_k}{P_k}$ - некоторые

пороговые значения, определяемые из условия обеспечения заданных вероятностей правильного распознавания заданных сигналов; p_k, a_j^k - порядок и параметры АР модели для k -го сигнала.

Согласно этому правилу, решение в пользу i -го заданного сигнала принимается в два этапа: при выполнении хотя бы одного из неравенств (2а), а также при выполнении системы неравенств (2б). Когда выполняются неравенства (2в), решение принимается в пользу сигналов из $M+1$ -го класса.

В указанном решающем правиле полагается, что параметры моделей для заданных M сигналов известны. При неизвестных параметрах моделей необходимо получить их оценки хорошо развитыми методами, в частности, методом Юла-Уокера [5]. При этом по классифицированным обучающим выборкам вычисляются корреляционные функции заданных сигналов и путем решения соответствующего уравнения находятся оценки параметров АР модели.

В ряде случаев для принятия решений может быть использовано более простое решающее правило, основанное на использовании в качестве информативных признаков распознавания оценок параметров АР модели для каждого сигнала. С учетом того, что распределение оценок параметров АР модели может быть аппроксимировано гауссовским законом, а также в предположении некоррелированности и близости дисперсии оценок параметров АР модели может быть получено следующее решающее правило [7]:

$$H^i: \sum_{j=1}^{p_k} \left(\hat{a}_j - m_j^k \right)^2 \leq \lambda_k', \quad k = \overline{1, M}, \quad (3a)$$

$$\sum_{j=1}^{p_i} \left(\hat{a}_j - m_j^i \right)^2 \leq \sum_{j=1}^{p_k} \left(\hat{a}_j - m_j^k \right)^2, \quad k = \overline{1, M}, \quad i \neq k, \quad (3б)$$

$$H^{M+1}: \sum_{j=1}^{p_k} \left(\hat{a}_j - m_j^k \right)^2 \leq \lambda_k', \quad k = \overline{1, M}, \quad (3в)$$

Здесь $\hat{a}_j$ - оценки параметров АР модели, найденные по наблюдаемой реализации распознаваемого сигнала $\bar{X}$; m_j^k - математическое ожидание оценок параметров АР, полученное по обучающей выборке реализаций k -го сигнала; λ_k' - некоторые пороговые значения, определяемые из условия обеспечения заданных вероятностей правильного распознавания заданных сигналов.

Оценивание рабочих характеристик алгоритмов распознавания. Для анализа описанных выше алгоритмов распознавания получены их рабочие характеристики методом статистического моделиро-

вания на выборках радиосигналов с различным видом и параметрами модуляции, характерных для задачи РК (табл.).

Выборки реализаций радиосигналов получены путем моделирования на ЭВМ методом комплексной огибающей. При моделировании каждая реализация радиосигнала представлялась последовательностью из $L = 512$ дискретных отсчетов, а объем выборок для каждого сигнала составлял 1000 реализаций. Полученные выборки разделены на обучающие и контрольные (по 500 реализаций). На рис. 1 приведены энергетические спектры радиосигналов, полученные в базисе ДЭФ. Здесь номера под рисунками соответствуют номерам сигналов в таблице.

Таблица

Номер сигнала	Описание сигнала
1	Белый шум
2	АТ-100 Бод
3	АТ-50 Бод
4	ОФТ-100 Бод
5	ЧТ2-100 Бод –200Гц
6	ЧТ4-100 Бод –200Гц
7	ЧТ2-50 Бод –200Гц
8	ЧТ4-50 Бод –200Гц
9	ОФТ-50 Бод
10	ОФТ-25 Бод
11	АТ-25 Бод

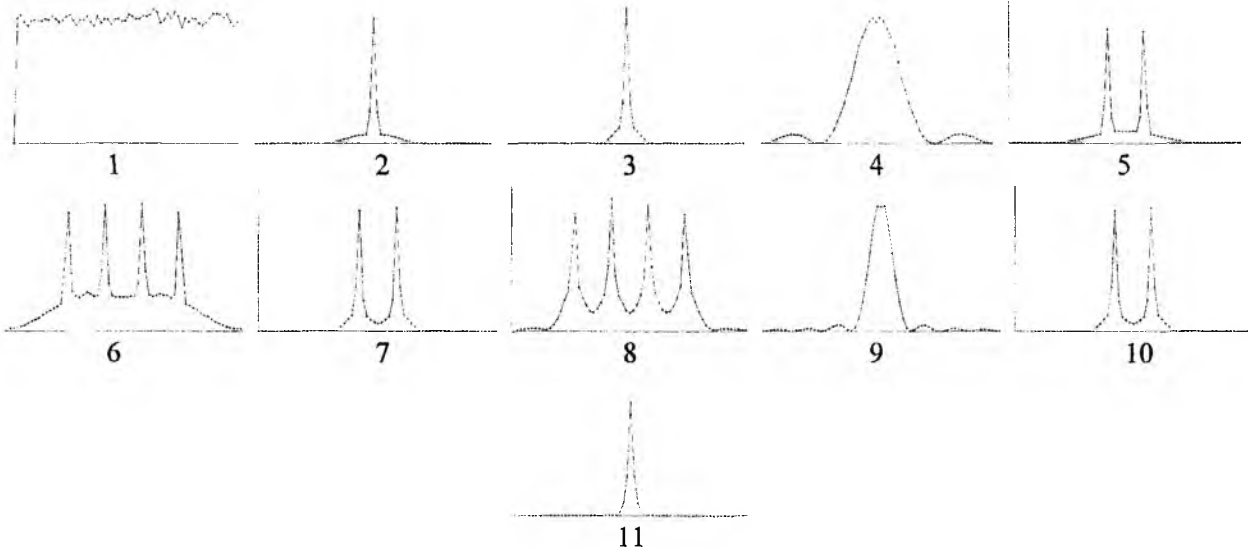


Рис. 1

Для проведения исследований разработан программный комплекс, включающий модуль моделирования обучающих и контрольных выборок реализаций радиосигналов, модуль оценивания параметров решающих правил на этапе обучения, а также модуль оценивания рабочих характеристик алгоритмов в режиме распознавания методом статистических испытаний.

Исследовано влияние порядка используемой АР модели на качество распознавания радиосигналов. Для упрощения рассматривалось решение классической задачи распознавания M сигналов (без учета $M+1$ -го класса), которое определяется соотношением (26). Получена зависимость оценки средней

вероятности ошибочного распознавания M сигналов $\hat{P}_{ош\,ср}$ от используемого порядка модели p (рис. 2). Видно, что уже для небольшого порядка АР модели ($p=20$) достигается достаточно высокое качество распознавания сигналов. Дальнейшее увеличение порядка модели p лишь незначительно снижает $\hat{P}_{ош\,ср}$. Это свидетельствует о достаточно высокой информативности описания радиосигналов АР моделью небольшого порядка.

Исследована также зависимость $\hat{P}_{ош\,ср}$ от длительности реализации сигнала T_n , подаваемой на распознавание. Эта зависимость для случая использования решающего правила (26) при $p=20$ приведена на рис. 3.

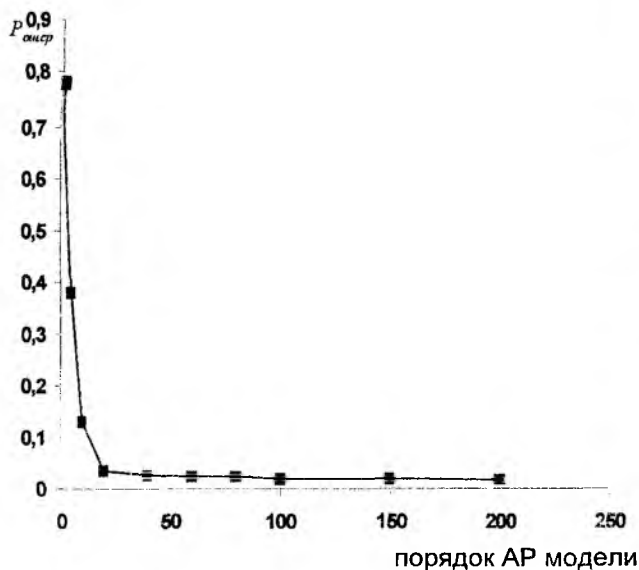


Рис. 2

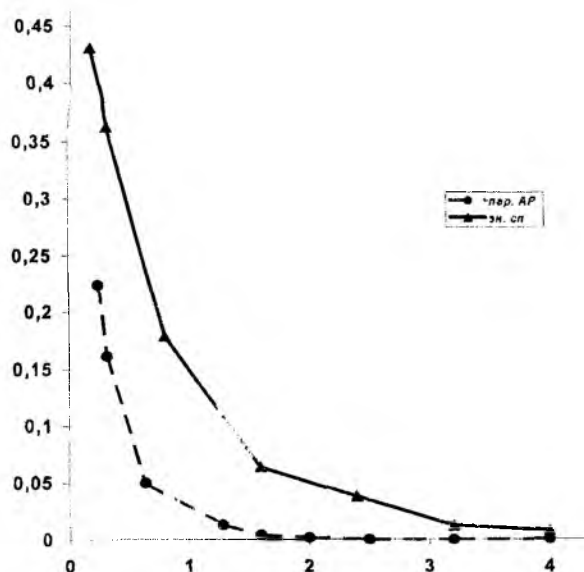


Рис. 3

Видно, что при $t > 1,8$ с увеличение длительности реализаций распознаваемых сигналов уже незначительно влияет на улучшение качества их распознавания. На рис. 3 также приведена зависимость $P_{ош.ср.} = f(\dots)$ для случая использования одного из спектральных алгоритмов распознавания по минимуму евклидова расстояния до эталонов в пространстве оценок энергетических спектров сигналов в базе ДЭФ [3], который применяется при решении задач радиоконтроля. Оба алгоритма учитывают различие распознаваемых сигналов на уровне их корреляционных функций и энергетических спектров. Результаты распознавания получены при прочих равных условиях наблюдения сигналов – одинаковой длительности наблюдаемой реализации сигналов. Из сравнения полученных зависимостей следует, что авторегрессионный алгоритм распознавания в рассмотренном случае обладает преимуществом по качеству распознавания при фиксированной длительности наблюдения сигналов.

Исследованы также показатели качества решения задачи распознавания заданных радиосигналов при наличии радиосигналов из M -го класса с применением авторегрессионного алгоритма распознавания (3). В качестве заданных сигналов использовались сигналы №1...6 (табл.), остальные пять сигналов представляли M -й класс неизвестных сигналов. Оценивались такие показатели качества распознавания:

$P_{н/з}$ – вероятность ошибочных решений о действии неизвестных сигналов из M -го класса при условии предъявления заданных сигналов;

$P_{з/н}$ – вероятность ошибочных решений о действии M заданных сигналов при условии предъявления неизвестных сигналов из M -го класса.

В результате исследований получены диаграммы обмена показателей качества распознавания в виде зависимости оценок $P_{н/з}$ от $P_{з/н}$ при различных длительностях реализаций сигналов, соответствующих $L=256$ и $L=512$. Эти зависимости приведены на рис. 4.

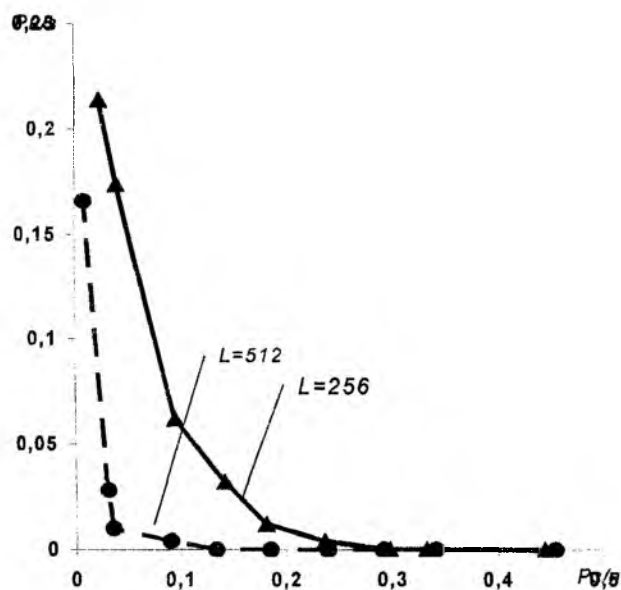


Рис. 4

Выводы

Рассмотрено решение задачи распознавания заданных радиосигналов при наличии класса неизвестных сигналов на основе авторегрессионной модели. Получены оценки рабочих характеристик алгоритмов распознавания в виде зависимости показателя качества распознавания от длительности реализации радиосигналов. Оценки получены методом статистического моделирования на выборках модельных радиосигналов, характерных для задач радиоконтроля. В результате сравнительных исследований авторегрессионного и одного из спектральных алгоритмов распознавания сигналов, используемого в автоматизированном комплексе РК, получено, что применение авторегрессионного алгоритма распознавания при фиксированной длительности наблюдения радиосигналов может обеспечить лучшее качество распознавания радиосигналов. Получены также диаграммы обмена показателей качества распознавания заданных радиосигналов при наличии класса неизвестных сигналов.

Список литературы: 1. Справочник по радиоконтролю: Пер. с франц. / Пестель Ж. Жоржена. Женева: Международ. союз электросвязи, 1995. 442с. 2. Мартынов В.А., Селихов Ю.И. Пакетные приемники и анализаторы спектра. М.: Сов. радио, 1980. 352с. 3. Омельченко В.А. Основы спектральной теории распознавания сигналов. Харьков: Вища школа, 1983. 156с. 4. Прикладная теория случайных процессов и полей / Коллект. моногр. под ред. К.К. Васильева, В.А. Омельченко. Ульяновск: УлГТУ, 1995. 256с. 5. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов: прогноз и управление. М.: Мир, 1974. 406с. 6. Омельченко В.А., Балабанов В.В., Безрук В.М., Омельченко А.В., Фелелов Н.А. Распознавание неполностью описанных случайных сигналов при наличии класса неизвестных сигналов // Отбор и обработка информации. 1992. Вып. 8. С. 71-80. 7. Кравченко Н.И., Безрук В.М., Тихонов В.А. Распознавание случайных сигналов в рамках авторегрессионной модели // Вероятностные модели и обработка случайных сигналов и полей. К: УМК ВО, 1991. С. 138-142.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 03.10.2001