

РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА

**Методы распознавания видов цифровой модуляции сигналов
в когнитивных радиосистемах**С. С. Аджемов¹, Н. В. Кленов^{1,2,a}, М. В. Терешонок¹, Д. С. Чиров¹¹ *Московский технический университет связи и информатики.
Россия, 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а.*² *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,
кафедра атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники.
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.
E-mail: ^a nvklenov@gmail.com*

Статья поступила 24.06.2015, подписана в печать 13.08.2015.

Представлен обзорный анализ проблемы автоматического распознавания видов цифровой модуляции радиосигналов, весьма актуальной для развития когнитивных систем радиосвязи, способных автоматически формировать и демодулировать сигналы во множестве полос частот и режимов модуляции. По результатам сравнения возможностей рассмотренных подходов (по форме сигнального созвездия, по распределению разности мгновенных фаз, с использованием кумулянтов высокого порядка) предлагается использовать методы распознавания видов модуляции на основе кумулянтного анализа и искусственных нейронных сетей. Демонстрируются возможности оптимизированного метода по автоматическому распознаванию сигналов (без высокоточной синхронизации приема по несущей частоте) с частотной (FSK), фазовой (PSK), амплитудно-импульсной (PAM) и квадратурной фазовой (QAM) модуляцией, где в качестве признаков распознавания используются значения кумулянтов и распределения разности мгновенных фаз сигналов. В качестве решающего устройства используется искусственная нейронная сеть.

Ключевые слова: распознавание, цифровая модуляция, радиосигнал, кумулянт, искусственные нейронные сети.

УДК: 621.376, 004.931, 519.67. PACS: 07.05.Mh, 84.35.+i, 84.40.Ua.

Введение

Для сохранения высоких темпов развития телекоммуникационных технологий и — шире — технологий, подразумевающих обработку слабых на фоне шумов широкополосных сигналов, необходимо совершенствовать как аппаратную базу, повышая рабочие частоты, увеличивая ее быстродействие, производительность и энергоэффективность, так и математические методы обработки поступающих данных.

Одним из перспективных направлений согласованного совершенствования аппаратной и программной частей является внедрение технологий «когнитивной обработки сигнала», способных получать и использовать информацию об актуальной эксплуатационной среде, динамически и автономно корректировать свои параметры и протоколы для достижения заранее поставленных целей, обучаться на основе полученных результатов. Основная особенность когнитивных информационных технологий — способность извлекать и анализировать информацию из окружающего радио пространства; предсказывать изменения канала связи; оптимальным образом подстраивать свои внутренние параметры, адаптируясь к изменениям радио среды. Причем серьезный интерес в последнее время вызывает организация когнитивных радиосистем с использованием контрольного

гармонизированного канала (cognitive pilot channel — CPC), через который передается минимальная достаточная информация, касающаяся полос частот, технологий радиодоступа, служб и состояния загрузки спектра в местоположении терминала.

В частности, предполагается, что системы радиосвязи, построенные с использованием технологий «когнитивной обработки сигнала», будут [1]:

- работать на всех частотах от 9 кГц до 300 ГГц с использованием по возможности узкополосных каналов управления с шириной полосы менее 50 кГц;
- принимать/передать и модулировать/демодулировать сигнал во всех полосах частот и всех режимах модуляции;

- допускать возможность программно-определяемого перестроения собственных параметров.

Реализация элементной базы, отвечающей перечисленным серьезным требованиям, возможна за счет использования чрезвычайно быстрой (с тактовой частотой для простейших устройств порядка 700 ГГц) и энергоэффективной электроники на основе сверхпроводящих квантовых интерференционных (СКВИД) устройств [2–5].

В части развития математического аппарата для когнитивной обработки сигналов особенно выделяется направление, связанное с режимом мониторинга

эфира, предусматриваемым концепцией когнитивного радио [6–8]. Важный частный проблемный вопрос мониторинга эфира состоит в разработке методов автоматического распознавания различных видов модуляции в условиях априорной неопределенности параметров принимаемых сигналов. Так, в телекоммуникационных системах выбор одного из многих возможных видов модуляции радиосигналов определяется как функциональными задачами системы радиосвязи, так и условиями ее работы.

Перспективные методы автоматического распознавания вида цифровой модуляции радиосигнала можно условно разделить на три основные группы по типу используемых для решения задачи признаков: по форме сигнального созвездия; по структурным признакам сигнала; с использованием статистических параметров сигнала. Целью настоящей статьи является анализ возможностей, определение проблемных вопросов и путей развития методов автоматического распознавания видов цифровой модуляции радиосигнала в системах когнитивного радио.

1. Методы распознавания вида цифровой модуляции радиосигнала по форме сигнального созвездия

Анализ сложившейся ситуации в мировом радиовещании показывает, что один из наиболее распространенных в современных системах связи видов модуляции — цифровая фазовая модуляция (phase-shift keying — PSK). Основным на сегодняшний день подходом к распознаванию PSK-сигналов является построение сигнальных созвездий [9]. При таком подходе информативным признаком является мгновенная угловая фаза сигнала и соответственно форма сигнального созвездия или гистограммы распределения мгновенных фаз. Качество распознавания по сигнальному созвездию во многом зависит от характеристик приемника и качества каналов связи (что можно в нулевом приближении охарактеризовать через отношения сигнал/шум (ОСШ) в системе), поэтому центральная проблема такого подхода состоит в восстановлении созвездия, использующем, как правило, алгоритмы на основе метода «fuzzy c-means» [9]. Эти алгоритмы относятся к классу итеративных алгоритмов кластеризации и позволяют распознавать сигналы с фазовой и амплитудно-фазовой модуляцией (quadrature amplitude modulation — QAM) при чрезвычайно низких значениях ОСШ: вплоть до 0 дБ.

Ограничением данного метода является необходимость синхронизации по несущей и тактовой частоте, а также требование априорного знания максимального количества узлов созвездия. В работе [10] предлагается развитие данного метода за счет использования самоорганизующихся карт Кохонена (КК) — одного из вариантов кластеризации многомерных векторов [11]. Преимущество усовершенствованного подхода — устранение требования

на априорное знание максимального количества узлов созвездия.

Развитием методов обучения на основе карт Кохонена является метод обучения с непараметрической адаптацией (PLSOM). В работе [12] показано, что алгоритм PLSOM обеспечивает большую устойчивость обучения, чем классический алгоритм SOM (self-organized maps), ввиду более слабой зависимости числа найденных при обучении кластеров от числа нейронов в карте.

Кроме того, при использовании для восстановления сигнального созвездия КК с алгоритмом обучения PLSOM отсутствует необходимость априорного знания максимального количества кластеров (количества фазовых позиций). В работе [10] показано, что алгоритм обеспечивает распознавание сигналов с цифровой фазовой модуляцией вплоть до значений ОСШ порядка 2 дБ при предельной относительной расстройке по несущей частоте регистрируемых радиосигналов $\sim 10^{-3}$. Отметим, что для систем когнитивного радио характерна более значительная неопределенность при синхронизации приемника.

2. Методы распознавания вида модуляции по распределению разности мгновенных фаз

В работе [13] для распознавания радиосигналов с фазовой и частотной модуляцией (frequency-shift keying — FSK) предлагается использовать значения разности мгновенных фаз в моменты времени nT и $(n-l)T$:

$$\Delta p(nT) = p(nT) - p((n-l)T), \quad (1)$$

где конкретное значение индекса l устанавливается с учетом максимальной скорости изменения анализируемого сигнала. Для PSK-сигналов при изменении значения модуляционного параметра пик функции плотности вероятности для значений $\Delta p(nT)$ будут приходиться на значения $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ (за исключением сигналов PSK-4 со сдвигом на $\pi/4$). Описываемый метод распознавания использует особенности поведения случайного процесса $\Delta p(nT)$, для которого параметром, наиболее полно отражающим различия распознаваемых совокупностей, является величина $x = \tau_1/\tau_0$, где τ_0 — время пребывания случайного процесса $\Delta p(nT)$ в интервале $[\pi/4, 7\pi/4]$, τ_1 — время пребывания случайного процесса $\Delta p(nT)$ в интервалах $[3\pi/8, 5\pi/8], [7\pi/8, 9\pi/8], [11\pi/8, 13\pi/8]$.

Для распознавания сигналов FSK и PSK используется выражение [13]

$$p_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \psi_i^1(nT), \quad (2)$$

где $\psi_i^1(nT) = 1$, если $\Delta p(nT) \in [3\pi/8, 5\pi/8] \cup [7\pi/8, 9\pi/8] \cup [11\pi/8, 13\pi/8]$, и $\psi_i^1(nT) = 0$ в противном случае. Решающее правило в данном случае выглядит следующим образом:

$$p_1 \geq 0.82 \rightarrow \text{принимается гипотеза «сигнал PSK»};$$

$$p_1 \leq 0.7 \rightarrow \text{принимается гипотеза «сигнал FSK»};$$

$0.7 < p_1 < 0.82 \rightarrow$ происходит отказ от принятия решения.

Аналогичным образом выполняется процедура различения сигналов PSK-2 и PSK-4. Лишь выражение (2) необходимо переписать в виде

$$p_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \psi_i^2(nT), \quad (3)$$

где $\psi_i^2(nT) = 1$, если $\Delta p(nT) \in [3\pi/4, 5\pi/4]$, и $\psi_i^2(nT) = 0$ в противном случае. Решающее правило для распознавания сигналов PSK-2 и PSK-4 можно записать как

$p_2 \geq 0.66667 \rightarrow$ принимается гипотеза «сигнал PSK-2»;

$p_2 < 0.66667 \rightarrow$ принимается гипотеза «сигнал PSK-4».

Суммируя данные по апробации приведенных решающих правил, можно заключить, что вероятность правильного различения PSK-2 и PSK-4 сигналов лежит в диапазоне 0.95–0.98 (при условии, что на вход устройства подается PSK-сигнал).

Преимущество рассмотренного здесь подхода — отсутствие необходимости синхронизации приема сигналов по несущей частоте. В частности, метод показал свою работоспособность при относительной расстройке по несущей частоте от 1 до 1000 Гц (частота дискретизации сигнала — 48 кГц, символьная скорость — 12 кбод, количество отсчетов — 1024). Однако данный метод оказался достаточно чувствительным к значениям ОСШ при приеме сигнала. На рис. 1 представлена рассчитанная нами зависимость входящих в решающие правила коэффициентов p_1 (для сигналов PSK и FSK) и p_2 (для сигналов PSK-2 и PSK-4) от характеристик приемника и качества каналов связи, выраженных через отношения сигнал/шум. Приведенные результаты экспериментов показывают, что различение сигналов PSK и FSK с использованием распределения разности мгновенных фаз возможно при ОСШ более

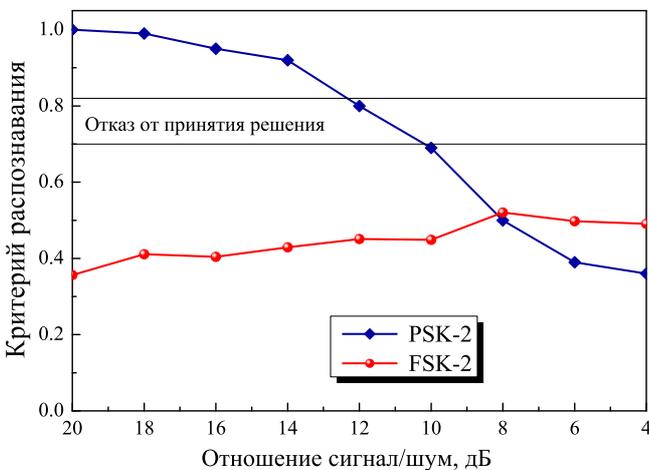


Рис. 1. Зависимость критерия различения сигналов PSK и FSK от ОСШ. Внизу: зависимость критерия различения сигналов PSK-2 и PSK-4 от ОСШ, дБ (на входе — цифровая модуляция PSK-2)

12 дБ, а сигналов PSK-2 и PSK-4 — более 8 дБ. С учетом реальной электромагнитной обстановки, сложность которой обуславливается размещением комплексов радиомониторинга в районах с развитой инфраструктурой и крупных населенных пунктах, достижение такого ОСШ в реальных условиях маловероятно.

Таким образом, основным недостатком различения PSK- и FSK-сигналов с использованием распределения изменений мгновенных фаз является низкая помехоустойчивость метода. При наложении аддитивного шума на PSK-сигнал вид сигнального созвездия сигнала искажается, причем возникает зависимость вида созвездия от интенсивности шума, что размывает пики функции плотности вероятности для значений $p(nT)$. В результате с увеличением интенсивности шума распределение случайного процесса $p(nT)$ стремится к равномерному, что приводит к ошибкам различения сигналов.

3. Методы распознавания видов цифровой модуляции радиосигналов по статистическим признакам

К классическим работам по распознаванию видов цифровой модуляции телекоммуникационных сигналов по статистическим признакам следует отнести статью Аззоуза и Нанди (Е. Е. Azzouz, А. К. Nandi) [14], опубликованную в 1995 г., и монографию этих авторов [15], изданную годом позже. В своих работах Аззоуз и Нанди вводят новую систему признаков распознавания цифровой амплитудной (ASK-2, -4), фазовой (PSK-2, -4) и частотной (FSK-2, -4) модуляции радиосигналов. Физической основой использования данной системы признаков являются особенности изменения мгновенных значений амплитуды, фазы и частоты сигнала при различных видах модуляции. Система представлена набором из пяти признаков распознавания, перечисленных ниже.

1. Максимальное значение спектральной плотности мощности нормально-центрированной мгновенной амплитуды принимаемого сигнала

$$\gamma_{\max} = \max |DFT(A_{cn}(i))|^2,$$

где DFT — дискретное преобразование Фурье, $A_{cn}(i)$ — значение нормально-центрированной мгновенной амплитуды в моменты времени $t = \frac{i}{f_s}$ ($i = 1, 2, \dots, N$), вычисляемое следующим образом:

$$A_{cn}(i) = A_n(i) - 1, \\ A_n(i) = \frac{A(i)}{m_a}, \quad m_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A(i).$$

В последних выражениях $A(i)$ — значение мгновенной амплитуды сигнала, N — количество отсчетов сигнала, f_s — частота дискретизации (sampling rate).

2. Стандартное отклонение абсолютного значения центрированной нелинейной компоненты мгновен-

ной фазы

$$\sigma_{ap} = \sqrt{\frac{1}{C} \left(\sum_{A_n(i) > a_t} \phi_{NL}^2(i) \right) - \left(\frac{1}{C} \sum_{A_n(i) > a_t} |\phi_{NL}(i)| \right)^2},$$

где $\phi_{NL}(i)$ — значение центрированной нелинейной компоненты мгновенной фазы; C — количество отсчетов нелинейной компоненты фазы, т.е. значений мгновенной фазы $\phi(i)$, для которых $A_n(i) > a_t$; a_t — пороговое значение $A_n(i)$.

Под нелинейной компонентой мгновенной фазы здесь понимается величина

$$\phi_{NL}(i) = \phi_{uw}(i) - \frac{2\pi f_c i}{f_s},$$

где $\phi_{uw}(i)$ — развернутая мгновенная фаза, f_c — несущая частота.

3. Стандартное отклонение центрированной нелинейной компоненты прямой мгновенной фазы

$$\sigma_{dp} = \sqrt{\frac{1}{C} \left(\sum_{A_n(i) > a_t} \phi_{NL}^2(i) \right) - \left(\frac{1}{C} \sum_{A_n(i) > a_t} \phi_{NL}(i) \right)^2}.$$

4. Стандартное отклонение абсолютного значения нормально-центрированной мгновенной амплитуды сигнала

$$\sigma_{aa} = \sqrt{\frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N A_{cn}^2(i) \right) - \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |A_{cn}(i)| \right)^2}.$$

5. Стандартное отклонение абсолютного значения нормировано-центрированной мгновенной частоты

$$\sigma_{fa} = \sqrt{\frac{1}{C} \left(\sum_{A_n(i) > a_t} f_N^2(i) \right) - \left(\frac{1}{C} \sum_{A_n(i) > a_t} |f_N(i)| \right)^2},$$

где

$$f_N(i) = \frac{f_m(i)}{r_b},$$

$$f_m(i) = f(i) - m_f, \quad m_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(i),$$

$f(i)$ — мгновенная частота сигнала, r_b — значение битовой скорости.

Анализ устойчивости данного метода к функционированию в реальных условиях показал, что метод работоспособен при ОСШ более 10 дБ; при относительной расстройке приемника по несущей частоте порядка единиц процентов ряд признаков, связанных с фазовой и частотной информацией (σ_{ap} , σ_{fa}), утрачивают информативность. Другим недостатком метода является неполный ряд распознаваемых видов модуляции, используемых в современных телекоммуникационных системах. В частности, здесь отсутствует возможность распознавания квадратурно-амплитудной модуляции (QAM).

Развитием метода «Azzouz & Nandi» является метод с расширенным спектром распознаваемых видов

модуляции (включены сигналы QAM-16) и использованием ряда дополнительных признаков распознавания — характеристик «разброса» амплитуды, фазы и частоты сигнала [16]:

$$R_a = \frac{m_a^2}{d_a}, \quad R_p = \frac{m_p^2}{d_p}, \quad R_f = \frac{m_f^2}{d_f},$$

где m_a , m_p , m_f — средние значения мгновенной амплитуды, фазы и частоты сигнала соответственно, а d_a , d_p , d_f — дисперсия мгновенной амплитуды, фазы и частоты сигнала.

Однако и здесь при относительной расстройке приемника по несущей частоте порядка единиц процентов признаки R_p и R_f утрачивают информативность.

Еще одна модификация метода «Azzouz & Nandi» — метод, в котором используется три новых признака распознавания вида модуляции сигнала [17].

1. Логарифм дисперсии абсолютных значений мгновенной амплитуды сигнала:

$$L\Delta_{aa}^2 = \lg \left(\frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N A_{cn}^2(i) \right) - \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |A_{cn}(i)| \right)^2 \right).$$

Признак $L\Delta_{aa}^2$ благодаря логарифмическому преобразованию позволяет более эффективно разделять ASK-2 и ASK-4 сигналы по сравнению с σ_{aa} .

2. Кубическая размерность (box dimension). Представим последовательность отсчетов мгновенной амплитуды сигнала как $a(1)$, $a(2)$, ..., $a(N)$, $a(N+1)$. Тогда кубическая размерность рассчитывается как

$$D(a) = 1 + \log_2 \frac{d(\Delta)}{d(2\Delta)},$$

где

$$d(\Delta) = \sum_{i=1}^N |a(i) - a(i+1)|,$$

$$d(2\Delta) = \sum_{i=1}^{N/2} (\max\{a(2i-1), a(2i), a(2i+1)\} - \min\{a(2i-1), a(2i), a(2i+1)\}).$$

Термин «кубическая размерность» в приведенных выше рассуждениях заимствован из теории фракталов [18]. Данный признак предлагается использовать для различения сигналов PSK-2 и PSK-4.

3. Стандартное отклонение абсолютного значения развернутой мгновенной фазы [17]

$$\Delta_{ap} = \sqrt{\frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \phi_{uw}^2(i) \right) - \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\phi_{uw}(i)| \right)^2}.$$

В отличие от σ_{ap} , данный признак не требует знания точного значения несущей частоты сигнала для расчета нелинейной компоненты мгновенной фазы. Δ_{ap} используется для различения сигналов PSK и FSK. Очевидно, что при расстройке приемника по несущей частоте эта характеристика утрачивает информативность.

Оригинальными признаками для различения видов модуляции сигналов являются характеристики огибающей сигнала. Для их расчета производится построение гистограмм 4 типов, с использованием оценки мощности сигнала P_s . К недостаткам этого метода следует отнести необходимость предварительной оценки ОСШ, что требует создания достаточно сложных измерительных схем, и необходимости задания экспертным методом целого ряда пороговых значений.

4. Пороговый метод распознавания видов цифровой модуляции радиосигналов с использованием кумулянтов высокого порядка

В отдельную группу методов распознавания видов цифровой модуляции сигналов можно выделить методы, использующие в качестве признаков распознавания кумулянты. Отличительной особенностью данных признаков является устойчивость к расстройке по несущей частоте при решении задачи распознавания.

Использованию кумулянтов различного порядка для распознавания видов модуляции радиосигналов посвящено достаточно большое количество работ [19, 20]. По сложившейся традиции кумулянт случайной величины называют коэффициент разложения логарифма ее характеристической функции в ряд Маклорена:

$$\ln \theta(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{C_k (ix)^k}{k!}. \quad (4)$$

Кумулянты C_1, C_2, C_3, C_4 называют средним значением, дисперсией, асимметрией и эксцессом случайной величины соответственно, причем связь между этими кумулянтами и моментами M_k случайной величины можно представить как

$$M_1 = C_1, \quad M_2 = C_2 + C_1^2, \quad M_3 = C_3 + 3C_1C_2 + C_1^3.$$

Разложение логарифма характеристической функции $\theta(x, y)$ для совокупности двух случайных величин в степенной ряд определяет кумулянт двумерного вероятностного распределения, описывающий статистические связи между указанными величинами:

$$\ln \theta(x, y) = \sum_{n,m=0}^{\infty} \frac{C_{nm} (ix)^n (iy)^m}{n!m!}, \quad (5)$$

где порядком кумулянта C_{nm} называют сумму индексов $n+m$. Также укажем, что совместными кумулянтами называются кумулянты, для которых n и m отличны от 0, причем для двумерного распределения Гаусса отличны от 0 только кумулянты 1-го и 2-го порядков, а если все совместные кумулянты равны 0, то случайные величины статистически независимы. Первый совместный кумулянт C_{11} описывает корреляцию случайных величин.

Основную идею метода распознавания видов модуляции с использованием кумулянтов высокого порядка можно сформулировать следующим образом:

совместные кумулянты случайной комплексной величины и величины, ей сопряженной, будут характеризовать статистическую связь между зарегистрированным и зеркально отображенным распределением мгновенной фазы сигнала. В частности,

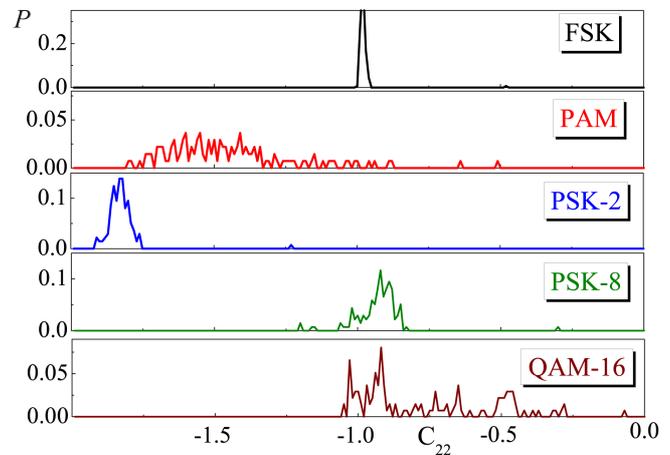


Рис. 2. Законы распределения значений кумулянта для различных типов модуляции сигналов

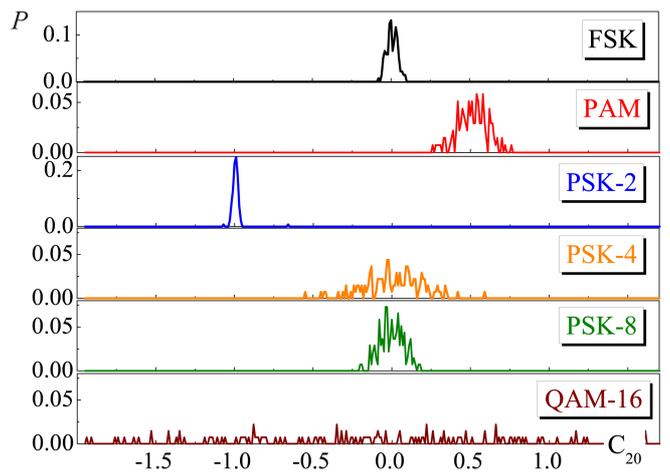


Рис. 3. Законы распределения значений кумулянта для различных типов модуляции сигналов

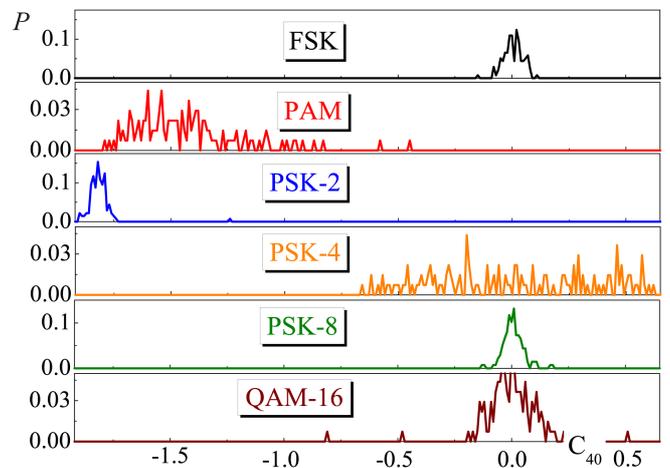


Рис. 4. Законы распределения значений кумулянта для различных типов модуляции сигналов

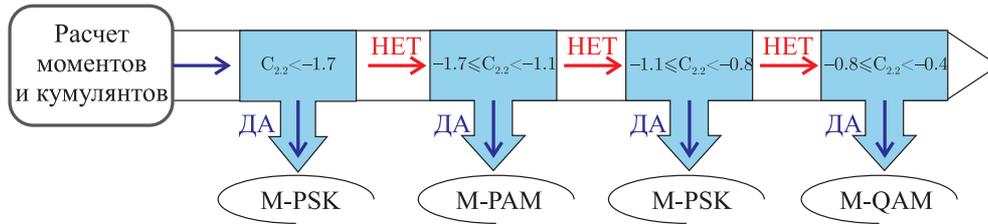


Рис. 5. Алгоритм распознавания видов модуляции, инвариантный к синхронизации приемника по несущей частоте сигнала

$$C_{2,2} = \text{cum}[x, x, \bar{x}, \bar{x}], \quad C_{2,2} = E_{2,2} - (E_{2,0})^2 - 2(E_{1,1})^2,$$

$$E_{2,2} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x^2 \cdot (\bar{x})^2).$$

Можно показать, что одни виды модуляции целесообразно распознавать с использованием кумулянтов 4-го порядка, другие — 2-го и т. д. Для примера на рис. 2, 3 и 4 приведены рассчитанные нами распределения значений ряда кумулянтов для различных типов модуляции сигнала. Синхронизация анализируемых сигналов по несущей частоте не осуществлялась, ОСШ всюду составляло 20 дБ. Результаты анализа представленных данных показывают, что с использованием кумулянта C_{22} можно уверенно выделить сигналы FSK, PSK-2 и PAM (pulse amplitude modulation), с использованием C_{20} — PSK-2, PAM, QAM-16, а с помощью кумулянта C_{40} — PSK-2, PSK-4, PAM. Таким образом, решение задачи по распознаванию типов модуляции с использованием кумулянтов высоких порядков требует подбора соответствующих кумулянтов и конкретных правил различения по результатам экспертного анализа значений кумулянтов для различных видов модуляции сигналов.

Разберем некоторые наиболее интересные с точки зрения полноты распознаваемых модуляций методы распознавания видов модуляции сигналов с использованием кумулянтов высокого порядка, среди которых считаем разумным выделить иерархическую схему распознавания M-PSK, M-QAM и M-PAM видов модуляции [19]. Наиболее успешно, как показали наши результаты моделирования, этот метод распознает четыре класса сигналов PSK-8, QAM-16, PAM-4 и BPSK, используя для этого решающее правило, где критерием является величина кумулянта $|C_{40}|$:

$$\begin{aligned} |C_{40}| < 0.34 &\Rightarrow \text{PSK} - 8, \\ 0.34 \leq |C_{40}| < 1.02 &\Rightarrow \text{QAM} - 16, \\ 1.02 \leq |C_{40}| < 1.68 &\Rightarrow \text{PAM} - 4, \\ 1.68 < |C_{40}| &\Rightarrow \text{BPSK}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для 4-классовой задачи при ОСШ = 10 дБ и сигнала длительностью 100 символов правильно распознается более 95% образцов контрольной выборки. Если увеличить длительности сигналов до 250 символов, то можно достичь практически полностью правильного распознавания видов модуляции

PSK-8, QAM-16, PAM-4 и BPSK. Предлагаемый в [19] метод распознавания для 4 видов модуляции исследован нами на устойчивость к относительной расстройке по несущей частоте. Численный эксперимент проводился для сигналов длительностью 250 символов, ОСШ = 20 дБ, причем относительная расстройка по несущей частоте составляла около 8%. Оказалось, что решающее правило (6) при наличии расстройки по несущей частоте не позволяет различать сигналы с модуляцией PSK-8, QAM-16 и BPSK. Проведенные авторами настоящей статьи дополнительные исследования позволили синтезировать алгоритм распознавания сигналов PSK, QAM и PAM, представленный на рис. 5 и являющийся инвариантным к качеству синхронизации приемника по несущей частоте сигнала.

Недостаток разработанного алгоритма состоит в отсутствии в распознаваемом наборе частотной модуляции (FSK): значения выбранного для использования в качестве критерия решающего правила кумулянта C_{22} для FSK- и PSK-сигналов находятся в одной области. Решение проблемы различения FSK-сигналов заключается в совместном применении кумулянтного анализа и метода оценки распределения разности мгновенных фаз. Использование кумулянта C_{22} позволяет отличить FSK- и PSK-сигналы от сигналов с модуляцией PAM и QAM. Далее, исходя из результатов приведенных в [19], из общего класса FSK- и PSK-сигналы с использованием C_{40} и E_{20} возможно выделение сигналов с модуляцией PSK-8 (значения данных показателей для этого типа модуляции близки к нулю). Из оставшейся смеси сигналов FSK и PSK-2, 4 можно выделить сигналы FSK с использованием метода оценки распределения разности мгновенных фаз по критерию (2). Алгоритм, позволяющий отличить FSK-сигналы от сигналов других типов модуляции, представлен на рис. 6.

5. Нейросетевое распознавание видов модуляции радиосигналов с использованием кумулянтов высокого порядка

Альтернативой к описанным выше способам формирования правил различения (классификации) являются различные методы интеллектуального анализа, в частности искусственных нейронных сетей (ИНС). Использование интеллектуальных методов анализа данных в задаче распознавания видов модуляции радиосигналов сводится в общем виде к на-

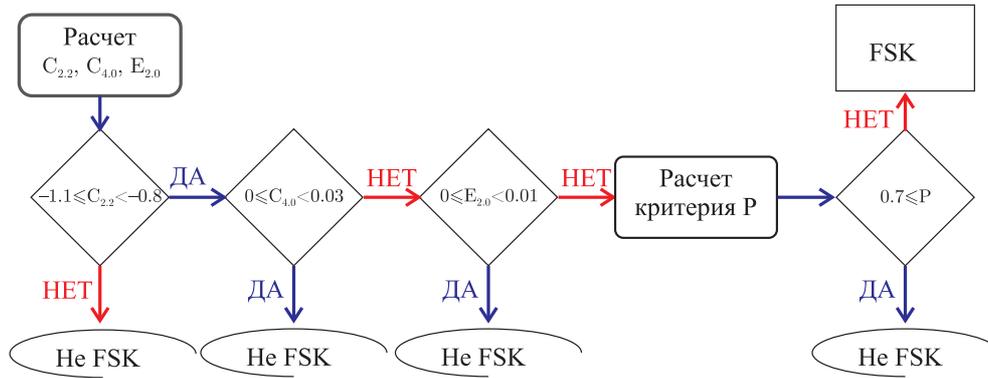


Рис. 6. Алгоритм различения FSK-сигналов

хождению информативных признаков распознавания и построению базы знаний (логических правил, деревьев решений, нейронных сетей) по результатам анализа этих признаков.

Высокую эффективность построения разделяющих поверхностей в многомерном случае показывает такой тип ИНС как многослойный перцептрон. В соответствии со следствием из теоремы Колмогорова–Арнольда–Хехт–Нильсена любую многомерную функцию нескольких переменных можно представить с помощью двухслойной нейронной сети с прямыми полными связями фиксированной размерности [22].

Нейросетевые методы распознавания видов модуляции [23, 24] отличаются друг от друга набором используемых признаков распознавания и параметрами ИНС (количеством слоев, видом функции активации и т. д.). В зависимости от используемого набора признаков обученная ИНС позволяет распознать определенный набор видов модуляции радиосигналов. Задачей исследователя в рассматриваемом случае является оптимизация структуры ИНС для наиболее эффективного распознавания (с требуемой вероятностью правильного решения) заданного набора видов цифровой модуляции сигналов. Последовательность действий по созданию нейросетевого устройства распознавания видов модуляции радиосигналов в системе когнитивного радио можно представить в виде следующих этапов.

Оптимизированное авторами нейросетевое распознавание видов модуляции радиосигналов с использованием статистических признаков распознавания, в том числе кумулянтов, можно описать при помощи следующей схемы [25–27].

Этап 1. Исходя из заданного набора требуемых к распознаванию видов модуляции $T = (T_1, T_2, \dots, T_n)$ проводится анализ информативных признаков $C = (C_1, C_2, \dots, C_m)$, с использованием которых возможно распознавание этих видов модуляции.

Этап 2. Проводится анализ ограничений на решение задачи, обусловленных средой распространения сигнала и параметров приемо-передающей аппаратуры: наличие помех, предельных ОСШ, качества

синхронизации и т. д.: $V = (V_1, V_2, \dots, V_k)$.

Этап 3. С учетом полученных ограничений V проводится анализ применимости выбранных признаков распознавания C , т. е.

$$(C_1, C_2, \dots, C_m) \xrightarrow{V} (C_1, C_2, \dots, C_l), \quad m \geq l.$$

Этап 4. С учетом количества признаков распознавания l и видов распознавания n формируется ИНС с параметрами $H = (l, n, \{Ns\}, Tr)$, где l — количество входов (соответствует количеству признаков распознавания), n — количество выходов ИНС (соответствует количеству распознаваемых видов модуляции), $\{Ns\}$ — параметры нейронов сети (количество слоев, количество нейронов в каждом слое, вид функции активации и т. д.), $\{Tr\}$ — параметры обучения ИНС (алгоритм обучения, максимальное количество циклов обучения, критерий остановки обучения и т. д.).

Этап 5. Проводится обучение ИНС. По результатам обучения возможна корректировка параметров $\{Ns\}$ и $\{Tr\}$. По результатам обучения и корректировки формируется итоговая ИНС для распознавания видов модуляции. Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод, что предварительно обученный многослойный перцептрон обеспечивает вероятность правильного распознавания модуляций радиосигналов: FSK-2 ~ 0.99 , PAM ~ 0.98 , PSK-2 ~ 0.99 , PSK-4 ~ 0.7 , PSK-8 ~ 0.98 , QAM-16 ~ 0.86 при ОСШ ~ 20 дБ. Невысокая вероятность распознавания сигналов PSK-4 объясняется достаточно сильным пересечением законов распределения используемых признаков у сигналов PSK-4 и PSK-8 (что видно из рис. 2–4). В случае если отождествление сигналов PSK-4 с PSK-8 не считать ошибкой, вероятность правильного распознавания PSK-4 составляет ~ 0.83 .

6. Выводы

Анализ различных подходов к автоматическому распознаванию видов модуляции радиосигналов показал, что в условиях априорной неопределенности параметров принимаемого сигнала наибольшей эффективностью для определения вида модуляции

обладают методы на базе кумулянтного анализа. Преимуществом данного подхода является широкий класс распознаваемых типов цифровой модуляции и отсутствие необходимости высокоточной синхронизации приема по несущей частоте сигнала. Применение в качестве решающего устройства искусственной нейронной сети позволяет учитывать реальную электромагнитную обстановку в месте функционирования когнитивной системы радиосвязи на этапе обучения за счет использования в составе обучающей выборки сигналов с соответствующим ОСШ.

Дальнейшим развитием «кумулянтных» методов распознавания видов цифровой модуляции радиосигналов и их применимости в системах когнитивного радио может являться исследование разделительных свойств кумулянтов более высокого порядка и их комплексирование с другими информативными признаками распознавания видов модуляции сигналов.

Работы выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (соглашение № 14.604.21.0005 (RFMEFI 60414X0005)).

Список литературы

1. http://www.itu.int/md/dologin_md.asp?lang=en&id=R08-SEM.RAD02-C-0005!!PDF-R.
2. Mukhanov O.A., Kirichenko D., Vernik I.V. et al. // IEICE Trans. Electron. 2008. **E91-C**. P. 306.
3. Nishijima S., Eckroad S., Marian A. et al. // Supercond. Sci. Technol. 2013. **26**. P. 113001.
4. Holmes D.S., Ripple A.L., Manheimer M.A. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2013. **23**. P. 1701610.
5. Mukhanov O., Gupta D., Kadin A., Semenov V. // Proc. of the IEEE. 2004. **92**. P. 1564.
6. Yan Q., Li M., Chen F. et al. // IEEE Trans. Wireless Commun. 2014. **13**. P. 5893.
7. Munjuluri S., Garimella R.M. // Procedia Computer Science. 2015. **46**. P. 1156.
8. Farooqi M., Tabassum S., Rehmani M., Saleem Y. // J. of Network and Computer Applications. 2014. **46**, November. P. 166.

9. Mobasser B.G. // Signal processing. 2000. **80**. P. 251.
10. Аджемов С.С., Стогов А.А., Терешонок М.В. и др. // Т-Сопт — Телекоммуникации и транспорт. 2011. **11**. С. 4.
11. Kohonen T. Self-Organization and Associative Memory. 2nd ed. B., 1987.
12. Аджемов С.С., Виноградов А.Н., Лебедев А.Н. и др. // Труды МТУСИ. 2007. С. 160.
13. Степанов А.В., Матвеев С.А. Методы компьютерной обработки сигналов систем радиосвязи. М., 2003.
14. Azzouz E.E., Nandi A.K. // Signal Processing. 1995. **47**. P. 55.
15. Azzouz E.E., Nandi A.K. Automatic Modulation Recognition of Communication Signals. Kluwer Academic Publishers, 1996.
16. Xiaoheng T., Juan L., Youqiang H. // Systems Engineering and Electronics. 2009. **31**, N 6. P. 1520.
17. Baojuan Z., Wenqun T. // Intern. J. of Advancements in Computing Technology (IJACT). 2012. **4**. P. 311.
18. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М., 2002.
19. Swami A., Sadler B. // IEEE Trans. Commun. 2000. **48**, N 3. P. 416.
20. Hatzichristos G., Fargues M.P. // IEEE. 2001. P. 1494.
21. Pedzisz M., Mansour A. // Digital Signal Processing. 2005, **15**. P. 295.
22. Hecht-Nielsen R. // IEEE First Annual Int. Conf. on Neural Networks. San Diego. 1987. **3**. P. 11.
23. Arulampalam G., Ramakonar V., Bouzerdoum A., Habibi D. // IEEE Proc. Signal Processing and Its Applications. 1999. **2**. P. 649.
24. Cheng Li, Liu Jin // Telekomnika Indonesian J. of Electrical Engineering. 2014. **12**, N 2. P. 1343.
25. Basu J. K., Bhattacharyya D., Kim T. // Intern. J. of Software Engineering and Its Applications. 2010. **4**, N 2. P. 23.
26. Popoola J.J. // J. of Engineering Science and Technology. 2014. **9**, N 2. P. 273.
27. Аджемов С.С., Терешонок М.В., Чиров Д.С. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2015. **1**. С. 23. (Adzhetov S.S., Tereshonok M.V., Chirov D.S. // Moscow University Physics Bulletin. 2015. **70**. P. 22.)

Methods for the automatic recognition of digital modulation of signals in cognitive radio systems

S. S. Adjemov¹, N. V. Klenov^{1,2,a}, M. V. Tereshonok¹, D. S. Chirov¹

¹ Moscow Technical University of Communications and Informatics (MTUCI), Moscow 111024, Russia.

² Department of Atomic Physics, Plasma Physics, and Microelectronics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^anvklenov@gmail.com.

This paper considers one of the problematic issues of creating radio systems based on cognitive radio technology, viz., automatic recognition of the digital-modulation formats of radio signals. In accordance with the recommendations of the E2R and the European Telecommunications Standards Institute (ETSI) consortium, cognitive radio systems have the ability to modulate/demodulate signals in all frequency bands and in all modes of modulation. This process should be performed automatically, according to the current technical capabilities of the available communication system, the requirements for the quality of communication, and different external conditions. This article provides an analysis of the promising methods of automatic recognition of digitally modulated radio signal formats, viz., using the shape of the phase constellation, using the distribution difference of instantaneous phases, and using high-order cumulants. According to the results of the analysis, we propose methods of recognition that are based on cumulant analysis for cognitive radio systems. It is proposed that the decision-making device be an artificial neural network.

Keywords: cognitive radio system, digital modulations, recognition, artificial neural networks, cumulants.

PACS: 07.05.Mh, 84.35.+i, 84.40.Ua.

Received 24 June 2015.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 6(2015).

Сведения об авторах

1. Аджемов Сергей Сергеевич — доктор техн. наук, нач. НИО МТУСИ, профессор; тел.: (495) 957-78-44, e-mail: adjemov@srd.mtuci.ru.
2. Кленов Николай Викторович — доцент, канд. физ.-мат. наук; тел.: (495) 939-25-88, e-mail: nvklenov@gmail.com.
3. Терешонок Максим Валерьевич — канд. техн. наук, зав. НИЛ МТУСИ; тел.: (495) 957-78-44, e-mail: tereshonok@srd.mtuci.ru.
4. Чиров Денис Сергеевич — доктор техн. наук, доцент, вед. науч. сотрудник МТУСИ; тел.: (495) 957-77-52, e-mail: chirov@srd.mtuci.ru.