

УДК 621.396.96

DOI: 10.52531/1682-1696-2023-23-1-24-32

Научная статья

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ ВИДОВ МОДУЛЯЦИИ: КУМУЛЯНТНЫЙ ПОДХОД

В.К. Курбанаалиев¹,
Ю.Н. Горбунов^{1,2}

¹АО «ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ ИМ. АКАДЕМИКА А.И. БЕРГА»

²ФИРЭ им. В.А. Котельникова

В статье описан аппарат определения видов модуляции на основе кумулянтов. Рассмотрен новый подход на основе кумулянтов до восьмого порядка. Дано обоснование применения кумулянтного метода. Представлены результаты применения искусственных нейронных сетей в задаче автоматизации выявления признаков внутриимпульсной модуляции для идентификации (классификации) сигналов в задачах радиомониторинга. Разработана математическая модель характерных типов модуляции, применяемых в радиолокации и связи. Описаны свойства каждого типа сигналов и предложен метод, позволяющий определить тип модуляции на основе вычисления информативных признаков. Моделирование проводилось в Matlab/Simulink.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: характеристика идентификации, фазовая манипуляция, квадратурная амплитудная модуляция, искусственные нейронные сети, кумулянты

1. ВВЕДЕНИЕ

Распознавание модуляции и классификация сигналов являются предметом значительных исследований уже более трех десятилетий. Для систем радиомониторинга, осуществляющих контроль радиообстановки в широком диапазоне частот представляет особый интерес к сигналам с низким отношением сигнал/шум q^2 (ОСШ q^2 – отношение сигнал/шум по мощности). Когда тип модуляции известен, сигнал может быть обработан и подавлен более эффективно. Распознавание модуляции состоит из трех этапов: предварительной обработки сигнала; выделения признаков; классификации и распознавания. Этап предварительной обработки сигнала включает в себя синхронизацию несущей с частотой и её понижением, выделение сигнала на фоне шума. Для этого этапа извлекают такие параметры, как отношения сигнал/шум, период символа, частоты несущей и т.д., извлекают определенные характеристики типа модуляции сигнала из данных, т.е. используют инструменты обработки сигналов, такие как моменты, кумулянты и т.д. Этап распознавания основан на извлечении признаков для определения и принятия решения.

Original article

AUTOMATIC MODULATION CLASSIFICATION: CUMULANT APPROACH

V.C. KURBANALIEV¹, YU.N. GORBUNOV^{1,2}

¹JSC «CENTRAL RESEARCH INSTITUTE
OF RADIO ENGINEERING NAMED AFTER
ACADEMICIAN A.I. BERG»

²FIRE THEM. V.A. KOTELNIKOVA

The article describes the apparatus for determining the types of modulation based on cumulants. A new approach based on cumulants up to the eighth order is considered. The rationale for the use of the cumulant method is given. The results of the application of artificial neural networks in the task of automating the detection of signs of intrapulse modulation for the identification (classification) of signals are presented. A mathematical model of characteristic types of modulation used in radar and communications has been developed. The main properties of each type of signals are described and a method is proposed that allows one to determine the type of modulation based on the calculation of informative features. The simulation was carried out in Matlab/Simulink.

KEY WORDS: identification characteristic, phase-shift keying, quadrature amplitude modulation, artificial neural networks, cumulants

Методы распознавания модуляции можно разделить на два класса: методы на основе теории принятия решений [13–14, 17–19] и методы на основе теории распознавания образов [5, 12, 16, 22].

Методы, основанные на теории принятия решений, используют для проверки гипотез метода максимального правдоподобия. Упрощенная структурная схема данного метода на основе проверки гипотез

H_1, H_2, \dots, H_m представлена на рисунке 1, где $L(x/H_m)$ – функция правдоподобия (вероятность), x – вектор входного сигнала.

Такой метод считается оптимальным, обеспечивая высокую точность и эффективность, но при этом существенным недостатком становятся высокие требования к производительности вычислительных ресурсов для случаев большого количества гипотез. Кроме того, метод чувствителен к отклонениям статистической модели от предполагаемой, например, при фазовом и частотном сдвиге, замираниях и импульсных помехах.

Метод на основе теории распознавания образов состоит из двух этапов: этап выделения признаков и этап классификации образов. Базовая схема алгоритма показана на рисунке 2.

Распознавание образов при различных методах выделения признаков можно разделить на:

- 1) метод распознавания модуляции на основе мгновенных значений амплитуды, частоты и фазы;
- 2) метод распознавания модуляции, учитывающий геометрические характеристики (сигнальные созвездия);
- 3) метод распознавания модуляции на основе классического частотно-временного анализа;
- 4) метод идентификации модуляции на основе статистик высокого порядка (кумулянтов, моментов и т.д.);
- 5) метод распознавания модуляции на основе циклоstationарных характеристик;
- 6) метод распознавания модуляции на основе спектрального анализа с применением нелинейных, в том числе, логарифмических преобразований;
- 7) метод распознавания на основе обобщенных спектральных преобразований с использованием вейвлетов, атомарных функций ортогонального разложения.

Для автоматического распознавания образов при различных критериях классификации в условиях отсутствия априорной информации часто используют структуры классификаторов – это дерево решений и нейронные сети.

Система автоматического распознавания видов модуляции состоит из следующих частей. Сначала

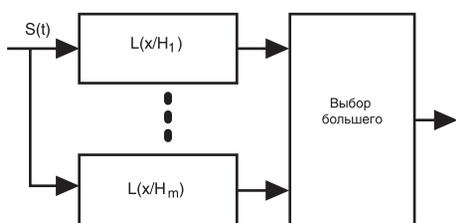


Рис. 1.

Классификатор на основе критерия максимум правдоподобия

сигнал поступает через канал связи. Затем из полученного сигнала вычисляются признаки. Наконец, классификатор использует извлеченные признаки для определения вида модуляции. На рисунке 3 представлена структурная схема определения видов модуляции сигналов.

Целью работы является создание и реализация алгоритма распознавания видов модуляции на основе кумулянтов с применением нейросетевого подхода.

Основные требования к алгоритму распознавания при выбранном критерии идентификации:

- 1) работа при малых и произвольных ОСШ q^2 ;
- 2) обеспечение устойчивых характеристик инструментального разрешения.

В настоящее время наиболее изучены алгоритмы распознавания фазоманипулированных сигналов и сигналов с квадратурной амплитудной модуляции с малым (2–8) числом градаций фазы (амплитуды).

В рамках данной статьи рассматриваются фазоманипулированные сигналы (BPSK, QPSK, 8-PSK, 16-PSK) и сигналы с квадратурной амплитудной модуляцией (4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM). Фазоманипулированные сигналы находят широкое применение в системах радиолокации и радиосвязи, так как они способствуют повышению степени помехоустойчивости системы и позволяют эффективно использовать диапазон частот радиоканала, а с точки зрения скорости передачи QAM намного более эффективен по сравнению с двоичной (BPSK), четырехпозиционной (QPSK) или восьмипозиционной (8-PSK) фазовой модуляцией. Следует заметить, что QPSK и 4-QAM на самом деле один и тот же вид модуляции. Особенность сигналов QAM – это возможность увеличивать количество сигнальных точек в обмен на помехоустойчивость. В результате в одной и той же полосе сигналов есть возможность увеличивать скорость передачи цифровой информации, однако все зависит от ОСШ q^2 . Ограничение на увеличение пропускной способности канала накладывает только сложность реализации аппаратуры.

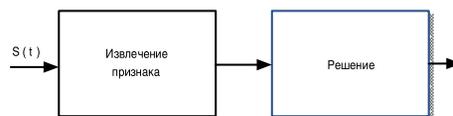


Рис. 2.

Классификатор на основе теории распознавания образов

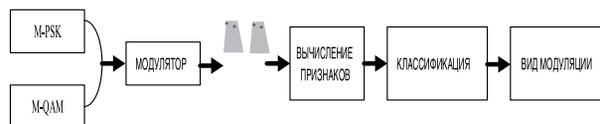


Рис. 3.

Структурная схема распознавание видов модуляции

РАСПОЗНАВАНИЕ ВИДОВ МОДУЛЯЦИИ

Для использования потенциальных возможностей пропускной способности канала, важно найти зависимость вероятности идентификации от различного ОСШ q^2 , поэтому в настоящей статье этому будет уделено большое внимание.

Важной задачей при распознавании видов модуляции сигналов на основе статистических закономерностей является извлечение признаков, вычисление которых затруднено в условиях больших изменений ОСШ q^2 . Диаграмма сигнального созвездия обеспечивает графическое представление синфазной и квадратурной составляющих сигнала с цифровой модуляцией. Сигнальные созвездия при изменении ОСШ q^2 «рассеиваются», поэтому в настоящей статье использован подход на основе характеристических функций, в котором преобразованием подвергаются не сами сигналы, а их распределения, которые нормированы к единице вероятностной мерой, что «стабилизирует» созвездия и превращает «параметрическую» зависимость от ОСШ q^2 в «непараметрическую» [2]. Для того чтобы решить проблему распознавания видов модуляции в этой статье используются кумулянты до восьмого порядка. Метод распознавания на основе кумулянтов обладает устойчивыми характеристиками и получил большое внимание в области распознавания модуляции [5, 12–14, 16–19, 22]. Кумулянты, в отличие от моментов, не могут быть определены напрямую через функцию распределения. Их определяют либо через логарифм характеристической функции, либо через моменты (второе определение на самом деле вытекает из первого) [4, 6, 7].

Принятый сигнал $s(t)$ может быть математически выражен как:

$$s(t) = x(t) + n(t),$$

где $x(t)$ – представляет собой аналитический сигнал и $n(t)$ – аддитивный комплексный шум, а $s(t)$ – ему сопряженный. Тогда совместные моменты можно выразить как:

$$M_{k+n,n} = M[s(t)^k \overline{s(t)}^n].$$

Значения кумулянтов могут быть выражены через совместные моменты согласно формуле (1):

$$C_{k+n,n} = cum \left[\underbrace{s, \dots, s}_k, \underbrace{\bar{s}, \dots, \bar{s}}_n \right] = \\ = \sum_{\forall \Omega} (-1)^{p-1} (p-1)! E \left[\prod_{i \in \Omega_1} s_i \right] \dots E \left[\prod_{i \in \Omega_p} s_i \right] \quad (1)$$

где $p = k+n$ порядок кумулянта и суммирование происходит по множеству $\Omega = (\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_p)$ при $i = \bar{1}, p$.

Для цифровых видов модуляции $x(t)$ может быть выражено в виде [20]:

$$x(t) = A \sum_i s_i g(t - iT) e^{j2\pi f_c t},$$

где A – амплитуда сигнала, $g(t)$ обозначает форму им-

пульса, f_c – несущая частота, T – период, а его обратная величина – символьная скорость, s_i – передаваемый символ. Для различных видов модуляции s_i будет соответственно принимать следующие дискретные значения:

$$\text{M-PSK: } s_i = \left\{ I_m = e^{j2\pi \frac{(m-1)}{M}}; m=1,2,\dots,M \right\}$$

$$\text{M-QAM: } s_i = \left\{ I_m = I_{I,m} + jI_{Q,m}; m=1,2,\dots,M \right\}$$

где, M – разрядность модуляции, $I_{I,m}$ и $jI_{Q,m}$ соответственно синфазная и квадратурная составляющие в созвездии QAM.

Цифровые виды модуляции удобно описываются с помощью сигнального созвездия. Например, в [1, 25] рассмотрены метод распознавания вида модуляции по сигнальному созвездию. Причиной недостатков данного метода распознавания является низкая информативность, вероятность правильного распознавания сильно зависит от ОСШ q^2 . На рисунке 4–5 показаны диаграммы сигнальных созвездий для сигналов с 16-PSK, 16-QAM и 64-QAM при ОСШ $q^2 = 20$ дБ и 5 дБ.

Диаграммы сигнальных созвездий показывают, что разницу между различными видами модуляции едва ли можно определить для произвольных ОСШ q^2 .

Для решения задачи классификации фазоманипулированных сигналов и сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией рассмотрим значения кумулянтов второго порядка (C_{20}, C_{21}), четвертого порядка (C_{40}, C_{41}, C_{42}), шестого порядка ($C_{60}, C_{61}, C_{62}, C_{63}$) и восьмого порядка ($C_{80}, C_{81}, C_{82}, C_{83}, C_{84}$).

На рисунке 6 представлены значения моментов и кумулянтов четвертого порядка в зависимости от отношения сигнал/шум для различных видов модуляции. Значения моментов с увеличением ОСШ q^2 стремятся к нулю или к единице, соответственно теряют информативность, а значения кумулянтов стабильны.

Как видно из рисунка 6 реализуется возможность выявления различий между видами модуляции, что упрощает задачу автоматической классификации.

Основное достоинство кумулянтного анализа, в отличие от моментов – высокая точность и однозначность классификации. Основной причиной использования в качестве информативных признаков в настоящей статье кумулянтных признаков заключается в том, что кумулянты выше второго порядка для гауссовского процесса равны нулю, а шумы в сетях связи, в большинстве случаев носят гауссовский характер, более того, закон распределения шума в канале связи близок к нормальному закону.

Для автоматизации процесса классификации видов модуляции сигналов могут быть применены искусственные нейронные сети [8–10], основанные на самообучении, что становится возможным в условиях недоступного аналитического описания сложных

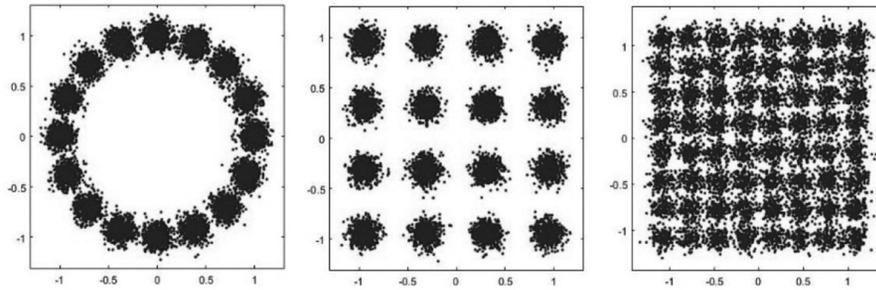


Рис. 4.
Диаграммы сигнальных созвездий при ОСШ $q^2 = 20$ дБ

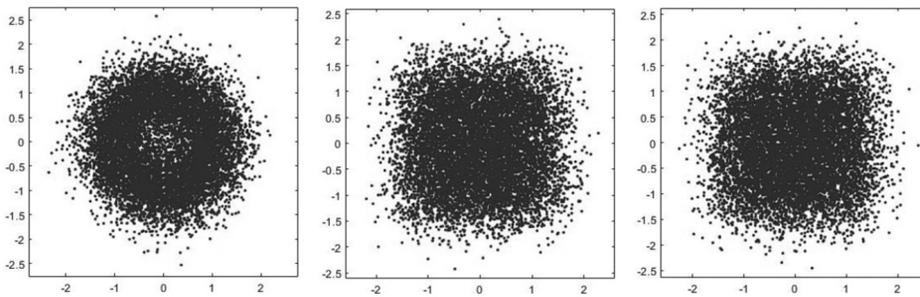


Рис. 5.
Диаграммы сигнальных созвездий при ОСШ $q^2 = 5$ дБ

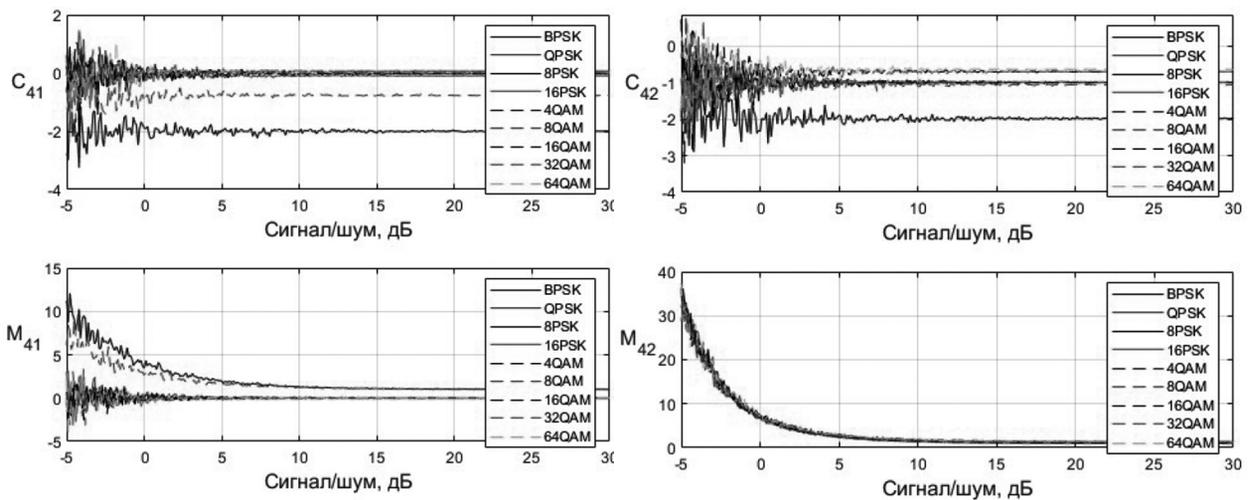


Рис. 6.
Значения моментов и кумулянтов C_{41} и C_{42}

моделей сигналов для большого динамического диапазона входных сигналов. На рисунке 7 представлена структура, основанная на самообучении двухслойной нейронной сети.

Выход нейронной сети отражают тип модуляции принятого сигнала. Предварительное обучение нейронной сети осуществляется с использованием метода Левенберга-Марквардта (trainlm). Для обучения

нейронной сети используется набор обучающих выборок, состоящий из двух составляющих: входной и целевой [3, 11]. Входная составляющая представляет собой значения кумулянтов (второго, четвертого, шестого, восьмого порядков и комбинации этих порядков), рассчитанные для сигналов с типами модуляции M-PSK ($M=2,4,8,16$) и M-QAM ($M=4,8,16,32,64$), а целевая – желаемое состояние выходов нейронной

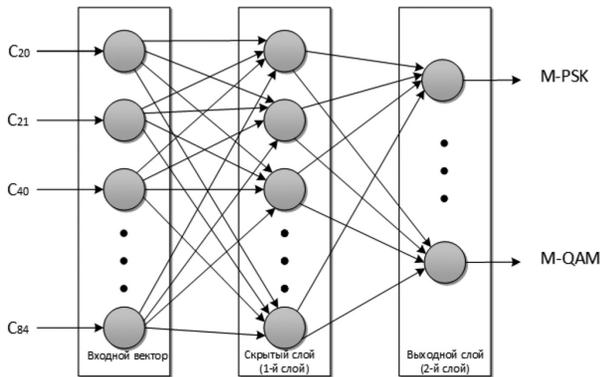


Рис. 7.

Структура двухслойной нейронной сети

сети, соответствующее выходной составляющей выборки.

Для обучения нейронной сети были использованы параметры, представленные в таблице 1.

На этапе распознавания типа модуляции сигнала, принятого с частотой дискретизацией F_s в полосе частот ΔF , имеющего продолжительность ΔT , формируем вектор признаков $C_{20}, C_{21}, C_{40}, C_{41}, C_{42}, C_{60}, C_{61}, C_{62}, C_{63}, C_{80}, C_{81}, C_{82}, C_{83}, C_{84}$ в соответствии с (1). С этой целью для последовательного вычисления кумулянтов из принятого сигнала формируется синфазная и квадратурная составляющие. Сформированный вектор признаков подается на входной слой нейронной сети. Далее поочередно для скрытого и выходного слоев нейронной сети в каждом нейроне вычисляется значение функции активации на основе выходных значений и коэффициентов весовых связей. В связи с тем, что каждый нейрон выходного слоя соответствует определенному виду модуляции, выбор нейрона с максимальным значением, в заданном интервале и будет определять искомый вид модуляции. В против-

ТАБЛИЦА 1.

Основные параметры нейронной сети

Количество слоев	2
Количество входов	2, 3, 4, 5 и 14
Количество нейронов в скрытом слое	32
Количество нейронов в выходном слое	9
Максимальное количество эпох	1000
Функция активации в скрытом слое	Tansig (гиперболическая касательная сигмоидальная передаточная функция)
Функция активации в выходном слое	Purelin (линейная передаточная функция)

ном случае считают, что тип модуляции сигнала неизвестен, требуется повторная запись и анализ.

Приведенные в таблицах 2–6 результаты распознавания получены методом имитационного моделирования при следующих исходных данных: число выборок сигналов по каждому виду модуляции 351, число отсчетов сигнала 1000, ОСШ q^2 – задана от минус 5 до 30 дБ с шагом 0.1. 80% использованы для обучения нейросети, а 20% – для тестирования и получения результата.

Оценка матрицы вероятностей распознавания типов модуляции для кумулянтов второго порядка (C_{20}, C_{21}), представлена в таблице 2.

Оценка матрицы вероятностей распознавания типов модуляции для кумулянтов четвертого порядка (C_{40}, C_{41}, C_{42}) представлена в таблице 3.

Оценка матрицы вероятностей распознавания типов модуляции для кумулянтов шестого порядка ($C_{60}, C_{61}, C_{62}, C_{63}$) представлена в таблице 4.

Оценка матрицы вероятностей распознавания типов модуляции для кумулянтов восьмого порядка ($C_{80}, C_{81}, C_{82}, C_{83}, C_{84}$) представлена в таблице 5.

Оценка матрицы вероятностей распознавания типов модуляции с применением кумулянтов второго, четвертого, шестого и восьмого порядков представлена в таблице 6.

Полученные результаты в таблицах 2–5 показывают, что для определения видов модуляции с вероятностью не ниже 90% достаточно кумулянтов второго порядка для сигналов с BPSK, кумулянтов четвертого порядка для сигналов с QPSK, 8-PSK, 4-QAM, 8-QAM, кумулянтов шестого порядка для сигналов с 32-QAM, кумулянтов восьмого порядка для сигналов с 64-QAM.

Из таблицы 6 видно, что общая вероятность распознавания видов модуляции, с использованием кумулянтов до восьмого порядка, достигает более 90%.

Таким образом, решение задачи распознавания видов модуляции с использованием кумулянтов высокого порядка показывает, что одни виды модуляции целесообразно распознавать с использованием кумулянтов второго порядка, а другие четвертого и т.д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ различных методов распознавания видов модуляции показал, что наибольшей эффективностью обладают методы на основе кумулянтного анализа.

Основным достоинством данного метода является широкий класс распознаваемых видов модуляции при различных отношениях сигнал/шум q^2 .

В условиях априорной неопределенности параметров принимаемого сигнала для идентификации видов модуляции рациональным является использование нейросетевого подхода.

Проведенные эксперименты показали, что вероятность правильного распознавания видов модуляции,

ТАБЛИЦА 2.

Матрица вероятности распознавания

		Результат распознавания								
		BPSK	QPSK	8-PSK	16-PSK	4-QAM	8-QAM	16-QAM	32-QAM	64-QAM
вход	BPSK	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	QPSK	0	0,72	0	0,11	0,0067	0	0	0	0,042
	8-PSK	0	0,025	0,14	0,12	0,22	0	0	0	0,042
	16-PSK	0	0,11	0,14	0,21	0,04	0	0	0,01	0,25
	4-QAM	0	0	0,29	0,11	0,29	0	0	0	0
	8-QAM	0	0	0	0	0	1	0	0,21	0
	16-QAM	0	0,037	0	0,11	0,15	0	0,83	0,34	0
	32-QAM	0	0,037	0,14	0,13	0,25	0	0	0,54	0
	64-QAM	0	0,074	0,29	0,2	0,04	0	0,17	0,24	0,67

ТАБЛИЦА 3.

Матрица вероятности распознавания

		Результат распознавания								
		BPSK	QPSK	8-PSK	16-PSK	4-QAM	8-QAM	16-QAM	32-QAM	64-QAM
вход	BPSK	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	QPSK	0	0,93	0	0	0,015	0	0	0	0,016
	8-PSK	0	0,011	0,93	0,091	0,015	0	0	0,015	0
	16-PSK	0	0,033	0,055	0,8	0,015	0	0	0,03	0
	4-QAM	0,011	0	0	0	0,91	0,015	0,034	0,015	0
	8-QAM	0,033	0,011	0	0	0	0,97	0,017	0	0,031
	16-QAM	0	0,011	0	0,03	0,046	0	0,73	0,015	0,062
	32-QAM	0	0,022	0	0,045	0	0	0,034	0,88	0,031
	64-QAM	0	0,011	0,018	0,03	0	0,015	0,19	0,045	0,86

ТАБЛИЦА 4.

Матрица вероятности распознавания

		Результат распознавания								
		BPSK	QPSK	8-PSK	16-PSK	4-QAM	8-QAM	16-QAM	32-QAM	64-QAM
вход	BPSK	0,99	0	0	0	0	0,014	0	0	0
	QPSK	0	0,9	0,046	0	0	0	0	0	0
	8-PSK	0	0,011	0,71	0,2	0,015	0	0,064	0	0
	16-PSK	0	0,045	0,17	0,8	0,031	0,015	0,032	0	0
	4-QAM	0	0,011	0,015	0	0,88	0,015	0,065	0	0,017
	8-QAM	0,011	0	0	0	0,031	0,95	0	0	0
	16-QAM	0	0,011	0,015	0	0,015	0	0,74	0,017	0,067
	32-QAM	0	0,011	0,031	0	0,015	0,015	0,048	0,98	0
	64-QAM	0	0,011	0,015	0	0,015	0	0,048	0	0,92

ТАБЛИЦА 5.

Матрица вероятности распознавания

		Результат распознавания								
		BPSK	QPSK	8-PSK	16-PSK	4-QAM	8-QAM	16-QAM	32-QAM	64-QAM
вход	BPSK	1	0	0	0	0	0	0,016	0	0
	QPSK	0	0,96	0,022	0,048	0	0	0,016	0	0
	8-PSK	0	0	0,84	0,2	0	0	0,016	0,035	0
	16-PSK	0	0	0,11	0,54	0,016	0	0,016	0	0
	4-QAM	0	0	0	0,038	0,92	0	0,031	0	0,017
	8-QAM	0	0	0	0,019	0,016	1	0,031	0	0
	16-QAM	0	0,026	0	0,038	0,016	0	0,78	0	0
	32-QAM	0	0,013	0	0,077	0,016	0	0,031	0,93	0
	64-QAM	0	0	0,022	0,038	0,016	0	0,062	0,034	0,98

ТАБЛИЦА 6.

Матрица вероятности распознавания

		Результат распознавания								
		BPSK	QPSK	8-PSK	16-PSK	4-QAM	8-QAM	16-QAM	32-QAM	64-QAM
вход	BPSK	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	QPSK	0	0,987	0,024	0,024	0	0	0	0	0
	8-PSK	0	0	0,904	0,032	0,027	0	0	0,016	0,016
	16-PSK	0	0	0,024	0,901	0,027	0	0,017	0	0
	4-QAM	0	0,013	0	0	0,852	0	0,011	0	0
	8-QAM	0	0	0	0	0,027	0,985	0,015	0	0
	16-QAM	0	0	0,024	0,024	0,013	0	0,911	0,016	0
	32-QAM	0	0	0,024	0,019	0,027	0	0,015	0,937	0
	64-QAM	0	0	0	0	0,027	0,015	0,031	0,031	0,984

с использованием кумулянтов до восьмого порядка, составляет более 90% благодаря комбинированной совокупности существенных признаков.

Использование данного метода позволит расширить круг решаемых задач радиомониторинга дистанционными методами и дополнить информацию, получаемую об источниках радиоизлучения. Найден конструктивный инженерный метод для разработки системы автоматического распознавания видов модуляции в задачах радио мониторинга. В развитие темы исследования предполагается выбрать значимые кумулянты, оптимизировать структуру сети, такую как добавление большего количества слоев, использование различных слоев активации, и т.д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аджемов С.С., Кленов Н.В., Терешонок М.В., Чиров Д.С. Методы распознавания видов цифровой модуляции сигналов в когнитивных радиосистемах. Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2015. № 6. С. 19–27.
2. Гаяк Я., Шидак З. Теория ранговых критериев. М.: Наука, 1971. 376 с.
3. Галушкин А.И. Нейронные сети: основные теории. М.: Горячая линия – Телеком, 2010. 480 с.
4. Кендалл М. Дж., Стьюарт А. Теория распределений. М.: Наука, 1966.
5. Курбанаалиев В.К. Кумулянтные признаки для определения типа манипуляции сигналов. РЭНСИТ, 2020. №12(3). С. 331–340. DOI: 10.17725/rensit.2020.12.331.
6. Леонов В.П., Ширяев А.Н. К технике вычисления семинвариантов. Теория вероятности и ее применение. 1959. Т. 4. Вып. 3. С. 342–355
7. Малахов А.Н. Кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований. М.: Сов. радио, 1978. 376 с.
8. Пат. RU 2510077, МПК G06N 3/02, 27.10.2013 Бюл. № 30. Способ и устройство автоматического распознавания типов манипуляции радиосигналов.

- Аджемов С.С., Терешонок М.В., Чирнов Д.С.
9. Пат. RU 2622846, МПК G06N 3/02, 20.06.2017 Бюл. № 17. Способ автоматического распознавания типа манипуляции радиосигналов. Елизаров В.В., Касаткин А.С., Наливаев А.В., Смирнов П.Л., Шепилов А.М.
 10. Пат. RU 2682304, МПК G06N 3/02, 18.03.2019 Бюл. №8. Способ распознавания типов манипуляции радиосигналов. Колбаско И.В., Квасов А.В., Юрьев И.А., Фесенко М.В.
 11. ХАЙКИН С. Нейронные сети: полный курс. Пер. с англ. под ред. Н.Н. Кузусль. 2-е изд. М.: Изд-ий дом "Вильямс", 2006. 1104 с.
 12. AZZOUE E.E., NANDI A.K. Automatic Modulation Recognition of Communication Signals. Kluwer Academic Publishers, 1996.
 13. DOBRE O., ABDI A., BAR-NESS Y., SU W. A Survey of Automatic Modulation Classification Techniques: Classical Approaches and New Trends, IEEE Proceedings on Communications, 2006.
 14. DOBRE O.A., HAMEED F. Likelihood-based algorithms for linear digital modulation classification in fading channels, in Proc. IEEE CCECE, 2006, Ottawa, Canada.
 15. DOBRE O.A., BARNES Y., SU W. Higher-order cyclic cumulants for high order modulation classification, In IEEE Military Communications Conference.2003. Vol. 1. P. 112-117. doi:10.1109/milcom.2003.1290087.
 16. DOBRE O.A., BAR-NESS Y., W. SU. Robust QAM modulation classification algorithm based on cyclic cumulants, in Proc. WCNC, 2004, pp. 745-748.
 17. LIU T., GUAN Y., LIN Y. Research on modulation recognition with ensemble learning. URASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2017. Vol. 179, N 1. doi:10.1186/s13638-017-0949-5.
 18. LONG C., CHUGG K., POLYDOROS A. Further results in likelihood classification of QAM signals, in Proc. MILCOM, 1994. P. 57–61.
 19. PANAGIOTOU P., ANASTASTASOPOULOS A., POLYDOROS A. Likelihood ratio tests for modulation classification. Proceedings of IEEE 21st Century Military Communications Conference, 2. P. 670–674.
 20. PROAKIS, JOHN G. Digital communications. John G. Proakis, Masoud Salehi. 5th ed.
 21. SPOONER C.M. On the utility of sixth-order cyclic cumulants for RF signal classification, In Conference Record of Thirty-Fifth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. 2001. Vol. 1. P. 890–897. doi:10.1109/acssc.2001.987051.
 22. SWAMI A., SADLER B.M. Hierarchical digital modulation classification using cumulants, IEEE Trans. Commun. 2000. Vol. 48. P. 416–429.
 23. VELAMPALLI C. Hierarchical blind modulation classification in the presence of carrier frequency offset. C. Velampalli, Master's Thesis. Communications Research Center, 2010. P. 1–39.
 24. ZHANG L. Research on modulation recognition algorithm based on high-order cumulant, Journal of Information Engineering University. 2017. Vol. 18. N 4. P. 403–408. doi: 10.3969/j.issn.1671-0673.2017.04.005.
- #### REFERENCES
1. ADZHEMOV S.S., KLENOV N.V., TERESHONOK M.V., CHIROV D.S. Methods for recognizing types of digital modulation of signals in cognitive radio systems. *Vestnik Moskovskogo universiteta*. Serii 3. Fizika. Astronomiia. 2015;6:19–27. (In Russian).
 2. GAEK IA., SHIDAK Z. Theory of rank criteria. Moscow: Nauka, 1971:376. (In Russian).
 3. GALUSHKIN A.I. Neural networks: basic theories. Moscow: Goriachaia liniia – Telekom, 2010:480. (In Russian).
 4. KENDALL M. DZH., ST'UART A. Distribution theory. Moscow: Nauka, 1966. (In Russian).
 5. KURBANALIEV V.K. Cumulant features for determining the type of signal manipulation. *RENSIT*. 2020; 12(3):331-340. DOI: 10.17725/rensit.2020.12.331. (In Russian).
 6. LEONOV V.P., SHIRIAEV A.N. On the technique of calculating semin variants. The theory of probability and its application. 1959;4(3):342–355. (In Russian).
 7. MALAKHOV A.N. Cumulant analysis of random non-Gaussian processes and their transformations. Moscow: Sov. radio, 1978:376. (In Russian).
 8. Pat. RU 2510077, МПК G06N 3/02, 27.10.2013 Биул. № 30. Sposob i ustroistvo avtomaticheskogo raspoznavaniia tipov manipuliatsii radiosignalov. Adzhemov S.S., Tereshonok M.V., Chirnov D.S. (In Russian).
 9. Pat. RU 2622846, МПК G06N 3/02, 20.06.2017 Биул. № 17. Sposob avtomaticheskogo raspoznavaniia tipa manipuliatsii radiosignalov. Elizarov V.V., Kasatkin A.S., Nalivaev A.V., Smirnov P.L., Shepilov A.M. (In Russian).
 10. Pat. RU 2682304, МПК G06N 3/02, 18.03.2019 Биул. №8. Sposob raspoznavaniia tipov manipuliatsii radiosignalov. Kolbasko I.V., Kvasov A.V., Iur'ev I.A., Fesenko M.V. (In Russian).
 11. KHAIKIN S. Neural networks: full course. Translation from English, ed. N.N. Kussul'. 2-e izd. Moscow: Izdatel'nyi dom "Vil'iams", 2006:1104. (In Russian).
 12. AZZOUE E.E., NANDI A.K. Automatic Modulation Recognition of Communication Signals. Kluwer Academic Publishers, 1996.
 13. DOBRE O., ABDI A., BAR-NESS Y., SU W. A Survey of Automatic Modulation Classification Techniques: Classical Approaches and New Trends, IEEE Proceedings on Communications, 2006.
 14. DOBRE O.A., HAMEED F. Likelihood-based algorithms for linear digital modulation classification in fading channels, in Proc. IEEE CCECE, 2006, Ottawa, Canada.

15. DOBRE O.A., BARNES Y., SU W. Higher-order cyclic cumulants for high order modulation classification, In IEEE Military Communications Conference, 2003;(1):112–117, 2003. doi:10.1109/milcom.2003.1290087.
16. DOBRE O.A., BAR-NESS Y., W. SU. Robust QAM modulation classification algorithm based on cyclic cumulants, in Proc. WCNC, 2004:745–748.
17. LIU T., GUAN Y., LIN Y. Research on modulation recognition with ensemble learning. URASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2017;(179); 1. doi:10.1186/s13638-017-0949-5.
18. LONG C., CHUGG K., POLYDOROS A. Further results in likelihood classification of QAM signals, in Proc. MILCOM, 1994:57–61.
19. PANAGIOTOU P., ANASTASTASOPOULOS A., POLYDOROS A. Likelihood ratio tests for modulation classification. Proceedings of IEEE 21st Century Military Communications Conference, 2:670–674.
20. PROAKIS JOHN G. Digital communications. John G. Proakis, Masoud Salehi. 5th ed.
21. SPOONER C.M. On the utility of sixth-order cyclic cumulants for RF signal classification, In Conference Record of Thirty-Fifth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. 2001:(1):890–897. doi:10.1109/acssc.2001.987051.
22. SWAMI A., SADLER B.M. Hierarchical digital modulation classification using cumulants, IEEE Trans. Commun. 2000;48:416–429.
23. VELAMPALLI C. Hierarchical blind modulation classification in the presence of carrier frequency offset. C. Velampalli, Master's Thesis. Communications Research Center, 2010:1–39.
24. ZHANG L. Research on modulation recognition algorithm based on high-order cumulant, Journal of Information Engineering University. 2017;(18);4:403–408, doi: 10.3969/j.issn.1671-0673.2017.04.005.

Курбаналиев Вагид Кадирбегович,
заместитель начальника отдела АО «Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт им. академика А.И. Берга»

☎ тел.: + (926)-889-80-91, e-mail.ru: vagdag05@mail.ru

Горбунов Юрий Николаевич,
д.т.н., профессор, ведущий научный сотрудник АО «Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт им. академика А.И. Берга»

☎ 107078, г. Москва, ул. Новая Басманная, д. 20, стр. 9,
107078, Moscow, st. New Basmanaya, b. 20, p. 9,
тел.: +7 (905)-523-39-29,
e-mail: gorbunov26.10.48@gmail.com