

New Microelectronics Technology and the Development of Advanced Neurocomputers

The article describes main problems and difficulties that are currently available and are likely to be present in the future in the field of development and introduction of new microelectronic technologies in the advanced neuro-computers.

This structure of works represents the operation procedure and composition of the work on introduction of new microelectronics technology in high-performance neurocomputers proposed by the author. Both the operation procedure and scope of work may vary depending on the type of technology, with required, or at least desirable, justification for the exclusion of certain stages of work presented below in this article:

- about classical possible approaches to task solutions;
- work structure for the design and implementation of neural network based algorithms for problem solving;
- the description of spiking neural network algorithms;
- development of neurochips and neuromorphic computers with use of memristor.

Keywords: neural network technology, new technology of microelectronics, spiking neural networks and neurochips, memristors

References

1. Galuskin A. I. O metodike peshenul zadach w neurosetevom logicheskom bazise. *Prilozhenie k zhurnaln "Informazionnie nechnologii*, 2006, no. 9, 24 p.
2. Spiking neural network. Wikipedia.
3. Akopyan F., Sawada J., Cassidy A., Alvarez-Icaza R., Arthur J., Merolla P., Imam N., Nakamura Y., Datta P., Nam Gi-Joon, Taba B.,

Beakes M., Brezzo B., Kuang J. B., Manohar R., Risk W. P., Jackson B., Modha D. S. TrueNorth: Design and Tool Flow of a 65 mW 1 Million Neuron Programmable Neurosynaptic Chip, *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, Oct. 2015, vol. 34, no. 10, pp. 1537–1557.

4. Galushkin A. I. Modely dlja razrabotki neurochipo v neuro-morfnyh computers, *Informatizacija u svjaz*, 2015, no. 4, pp. 35–42.

УДК 621.391.037.372

В. Н. Дам, аспирант, e-mail: damvan.nhich@gmail.com,
Московский физико-технический институт

Автоматическое распознавание цифровой модуляции радиосигналов с помощью многослойной нейронной сети по кумулянтным признакам

Решается задача распознавания видов цифровой модуляции радиосигналов с помощью многослойной нейронной сети. Распознавание проводится с основными видами цифровой модуляции: 2-PSK, 4-PSK, 8-PSK, 2-FSK, 8-QAM, 16-QAM, 64-QAM. Лучший результат был показан при использовании девяти признаков и 40 нейронов в скрытом слое.

Ключевые слова: модуляция, распознавание вида модуляции, IQ-сигналы, моменты, кумулянты, гауссовый шум, нейронная сеть, Neural Network Toolbox

Введение

В коммуникационной системе важной задачей является распознавание заданных видов модуляции радиосигналов, т. е. радиосигналов с заданными видами модуляции. Эта задача сложная, сложность обусловлена тем, что здесь распознаванию подлежат целые классы сигналов — радиосигналы с заданными видами модуляции и разными значениями параметров модуляции. Распознавание видов модуляции радиосигналов в реальных условиях затрудняется появлением радиосигналов с новыми неизвестными ранее видами модуляции.

1. Модуляция и задача распознавания видов цифровой модуляции

В практике чаще всего используют фазовую (M-PSK), частотную (M-FSK) и квадратурную амплитудную модуляцию (M-QAM), где M — уровень квантования сигнала. Существуют несколько подходов к решению поставленной задачи, но чаще всего применяются три подхода: нейронные сети [1–4], кумулянты высокого порядка [5, 6] и спектральные признаки [7, 8]. В настоящей работе исследуется возможность повышения эффективности распознавания видов цифровой модуляции с помощью ней-

ронной сети. Нейронные сети использовались для распознавания видов модуляции радиосигналов во многих работах, в которых рассматривались сигналы с гауссовым шумом.

В работе [5] использован набор кумулянтов $C_{2,0}, C_{4,0}, C_{8,0}$ для распознавания семи видов модуляции (2-PSK, 4-PSK, 8-PSK, 2-FSK, 8-QAM, 16-QAM, 64-QAM) в качестве признаков для дерева логических решений. В результате при отношении сигнала к шуму (ОСШ) ≥ 5 дБ — практически 100 %-ное распознавание вида модуляции, при ОСШ = 0 дБ результат для 64-QAM слишком низкий (57,8 %). Весь процесс выбора параметров дерева логических решений выполнялся вручную. Этот подход требует больших временных ресурсов, и может возникнуть погрешность в выборе предельных значений для построения дерева логических решений.

В работе [1] использована нейронная сеть для распознавания видов модуляции (2-ASK, 4-ASK, 2-PSK, 4-PSK, 2-FSK, 4-FSK, 16-QAM, V29, V32, 64-QAM). Признаками для входа нейронной сети являются кумулянты $C_{2,0}, C_{1,1}, C_{0,2}, C_{3,0}, C_{2,1}, C_{1,2}, C_{0,3}, C_{4,0}, C_{3,1}, C_{2,2}, C_{1,3}, C_{0,4}$. Табл. 1 показывает, как число нейронов в скрытом слое влияет на результаты распознавания.

Таблица 1

Результаты распознавания при различных количествах нейронов в скрытом слое (10 и 40 нейронов)

Число нейронов в скрытом слое	Отношение сигнала к шуму (ОСШ)				
	-5 дБ	0 дБ	5 дБ	10 дБ	20 дБ
10	73,62 %	87,02 %	99,26 %	89,86 %	99,93 %
40	89,64 %	98,01 %	99,33 %	99,86 %	99,99 %

Таблица 2

Результаты распознавания при использовании 10 нейронов в скрытом слое

ОСШ	Виды модуляции						
	2-ASK	2-PSK	2-FSK	4-ASK	4-PSK	4-FSK	16-QAM
5 дБ	98 %	99,1 %	85,8 %	88,7 %	97 %	91 %	76,7 %
10 дБ	98,3 %	99,5 %	99 %	99,1 %	99 %	99 %	93,3 %
15 дБ	99 %	99,8 %	100 %	99,8 %	99,6 %	99,4 %	99,5 %

Таблица 3

Результаты распознавания в работе [4]

Число нейронов в скрытом слое	ОСШ	
	10 дБ	20 дБ
5	81,5 %	83,1 %
10	97,4 %	99,6 %
15	93,7 %	99,6 %

Таблица 4

Исходные параметры

Параметры	Значение
Частота дискретизации, Гц	500 000
Символьная скорость, Гц	5000

В работе [2] описана нейронная сеть для распознавания видов модуляции: 2-ASK, 2-PSK, 2-FSK, 4-ASK, 4-PSK, 4-FSK, 16-QAM. В качестве входа использованы только спектральные признаки:

- максимальное значение спектральной плотности мощности нормированной центрированной мгновенной амплитуды γ_{\max} ;
- стандартное отклонение абсолютного значения центрированных нелинейных компонент мгновенной фазы σ_{ap} ;
- стандартное отклонение значения центрированных нелинейных компонент мгновенной фазы σ_{dp} ;
- стандартное отклонение абсолютного значения нормированной центрированной мгновенной амплитуды σ_{aa} ;
- стандартное отклонение абсолютного значения нормированной центрированной мгновенной частоты σ_{af} .

Авторы экспериментировали с различным числом нейронов в скрытом слое (1, 5, 10, 15 нейронов). В табл. 2 представлены результаты при использовании 10 нейронов в скрытом слое.

В статье [3] использованы два спектральных признака (максимальное значение спектральной плотности мощности нормированной центрированной мгновенной амплитуды γ_{\max} , среднее значение центрированного нормированного абсолютного мгновенного фазового отклонения m_{pd}) в качестве входа нейронной сети для распознавания восьми видов модуляции 2-ASK, 2-FSK, 4-ASK, 4-FSK, 2-PSK, 4-PSK, DPSK и 16-QAM. Для каждого вида модуляции использовано 200 сигналов. Средняя вероятность распознавания составила 80 % при ОСШ = 10 дБ и 85 % при ОСШ = 20 дБ.

В работе [4] исследованы шесть видов цифровой модуляции: 2-ASK, 4-ASK, 2-PSK, 4-PSK, 2-FSK, 4-FSK с помощью шести спектральных признаков (пять признаков из [2] и коэффициент P). Результаты их работы внесены в табл. 3.

Из изложенного выше следует, что применение различных признаков и структур нейронной сети в задаче распознавания вида модуляции приводит к различной точности решения данной задачи. Эффективное применение кумулянтных признаков и правильный выбор структуры нейронной сети для решения задачи распознавания вида цифровой модуляции и является целью настоящей работы.

2. Постановка задачи

Отправитель передает сигнал с одним из следующих видов цифровой модуляции: 2-PSK, 4-PSK, 8-PSK, 2-FSK, 8-QAM, 16-QAM, 64-QAM. Получатель принимает искаженный аддитивными комплексными гауссовыми белыми шумами $\xi(t)$ переданный сигнал $z(t)$, $t = 0, T$,

$$z(t) = a(t) + \xi(t), \quad (1)$$

где $a(t)$ — переданный сигнал без шума.

Принимаемый сигнал проходит через цифровой понижающий преобразователь (Digital Down Converter), и на выходе этого преобразователя получаем I (синфазную составляющую) и Q (квадратурную составляющую) сигналы, которые являются исходными данными для поставленной задачи. Получателю известны следующие параметры переданного сигнала: частота дискретизации и символьная скорость (табл. 4).

Получателю требуется распознавать используемый вид цифровой модуляции.

3. Выбор признаков для входа нейронной сети

Пусть получаемый модулированный сигнал имеет вид

$$a(t) = A(t)\cos[\omega(t)t + \phi(t)]$$

или

$$a(t) = A(t)\cos[\omega(t)t]\cos\phi(t) - A(t)\sin[\omega(t)t]\sin\phi(t).$$

Если частота не меняется, тогда модулированный сигнал можно записать в виде

$$a(t) = A(t)\cos\omega_c t \cos\phi(t) - A(t)\sin\omega_c t \sin\phi(t),$$

где ω_c — несущая частота.

Следовательно,

$$a(t) = I(t)\cos\phi(t) - Q(t)\sin\phi(t),$$

где $I(t) = A(t)\cos\omega_c t$ и $Q(t) = A(t)\sin\omega_c t$.

Модулирующий сигнал $s(t)$ представлен синфазной составляющей $I(t)$ и квадратурной составляющей $Q(t)$:

$$s(t) = I(t) + jQ(t). \quad (2)$$

Тогда $a(t)$ можно записать в виде

$$a(t) = \text{Re}[s(t)\exp(j\omega_c t)]. \quad (3)$$

Рассмотрим случайный комплексный модулирующий сигнал $s_i(t) = I(t) + jQ(t)$ [12] и комплексно сопряженный к нему сигнал $\bar{s}_i(t) = I(t) - jQ(t)$. Такому сигналу соответствует двумерная плотность распределения вероятностей $h(x, y)$ и соответствующая двумерная характеристическая функция $\theta(u, v)$, являющаяся Фурье-преобразованием двумерной плотности распределения вероятностей $h(x, y)$.

Моменты случайного сигнала представляют собой множество параметров, которое характеризует распределение плотности вероятностей случайного процесса. Однако это множество не является единственным и тем более наилучшим для решения ряда практических задач.

Иное множество параметров — так называемых кумулянтов, обладает свойствами, более полезными как с теоретической, так и с практической точки зрения.

Коэффициенты $C_{n, m}$ разложения логарифма характеристической функции $\theta(u, v)$ в ряд Тейлора

$$\ln\theta(u, v) = \sum_{n, m=0}^{\infty} C_{n, m} (iu)^n (iv)^m / n!m! \quad (4)$$

являются кумулянтами данного распределения [11]. Порядком кумулянта r называется сумма $r = n + m$.

К важнейшим свойствам кумулянтов относится тот факт, что для двумерной нормальной плотности распределения только кумулянты первого и второго порядков отличны от нуля. Таким образом, кумулянты характеризуют негауссовость случайного процесса, а поскольку модулированные процессы существенно негауссовы, то кумулянты служат индикаторами соответствующих видов модуляции.

Для комплексного цифрового модулированного сигнала $s_i(t)$ моменты двумерного распределения $E_{n, m}$ имеют вид $E_{n, m} = \text{Ex}(s_i^n \bar{s}_i^m)$ [6], где Ex — символ математического ожидания, \bar{s}_i — комплексно-сопряженный сигнал. Порядком момента, как и для кумулянта, является сумма $r = n + m$. Кумулянты r -го порядка выражаются через моменты до r -го порядка включительно. Предполагаем, что сигнал $s(t)$ — центрированный.

В табл. 5 представлены формулы для вычисления кумулянтов второго, четвертого, шестого и восьмого порядков. Значения кумулянтов являются комплексными числами. Основные отличия значений кумулянтов для различных видов манипуляции проявляются в значениях их действительных частей. Поэтому в качестве распознающего признака здесь приняты значения действительных частей кумулянтов (далее будем называть значением кумулянтов) [5].

Таблица 5

Формулы для вычисления кумулянтов

Порядок	Кумулянт	Выражение через моменты
2	$C_{2,0}$	$C_{2,0} = E_{2,0} = E[s^2(\bar{s})^0]$
2	$C_{1,1}$	$C_{1,1} = E_{1,1} = E[s(\bar{s})]$
4	$C_{4,0}$	$E_{4,0} - 3(E_{2,0})^2$
4	$C_{3,1}$	$E_{3,1} - 3E_{2,0}E_{1,1}$
4	$C_{2,2}$	$E_{2,2} - (E_{2,0})^2 - 2(E_{1,1})^2$
6	$C_{6,0}$	$E_{6,0} - 15E_{2,0}E_{4,0} + 30(E_{2,0})^3$
6	$C_{5,1}$	$E_{5,1} - 10E_{2,0}E_{3,1} - 5E_{1,1}E_{4,0} + 30(E_{2,0})^2E_{1,1}$
6	$C_{4,2}$	$E_{4,2} - E_{2,0}E_{4,0} - 8E_{1,1}E_{3,1} - 6E_{2,0}E_{2,2} + 6(E_{2,0})^3 + 24(E_{1,1})^2E_{2,0}$
6	$C_{3,3}$	$E_{3,3} - 6E_{2,0}E_{3,1} - 9E_{1,1}E_{2,2} + 18(E_{2,0})^2E_{1,1} + 12(E_{1,1})^3$
8	$C_{8,0}$	$E_{8,0} - 35(E_{4,0})^2 - 630(E_{2,0})^4 + 420(E_{2,0})^2E_{4,0}$
8	$C_{7,1}$	$E_{7,1} - 35E_{4,0}E_{3,1} - 630(E_{2,0})^3E_{1,1} + 210E_{4,0}E_{2,0}E_{1,1} + 210(E_{2,0})^2E_{3,1}$
8	$C_{6,2}$	$E_{6,2} - 15E_{4,0}E_{2,2} - 20(E_{3,1})^2 + 30E_{4,0}(E_{2,0})^2 + 60E_{4,0}(E_{1,1})^2 + 240E_{3,1}E_{1,1}E_{2,0} + 90E_{2,2}(E_{2,0})^2 - 90(E_{2,0})^4 - 540(E_{2,0})^2(E_{1,1})^2$
8	$C_{5,3}$	$E_{5,3} - 5E_{4,0}E_{3,1} - 30E_{3,1}E_{2,2} + 90E_{3,1}(E_{2,0})^2 + 120E_{3,1}(E_{1,1})^2 + 180E_{2,2}E_{1,1}E_{2,0} + 30E_{4,0}E_{2,0}E_{1,1} - 270(E_{2,0})^3E_{1,1} + 360(E_{1,1})^3E_{2,0}$
8	$C_{4,4}$	$E_{4,4} - (E_{4,0})^2 - 18(E_{2,2})^2 - 16(E_{3,1})^2 - 54(E_{2,0})^4 - 144(E_{1,1})^4 - 432(E_{2,0})^2(E_{1,1})^2 + 12E_{4,0}(E_{2,0})^2 + 96E_{3,1}E_{1,1}E_{2,0} + 144E_{2,2}(E_{1,1})^2 + 72E_{2,2}(E_{2,0})^2 + 96E_{3,1}E_{2,0}E_{1,1}$

Правилами, по которым надо выбрать кумулянты для входа нейронной сети, являются следующие:

- значения кумулянтов не должны зависеть от уровня (ОСШ), т. е. значения кумулянтов не должны значительно изменяться, когда изменяются значения ОСШ;
- не должно быть похожих кумулянтов, значения действительных частей которых одинаковые.

Рассмотрим сигнал $s(t) = a + bj$. Для такого сигнала кумулянт

$$C_{2,0} = E_{2,0} = (a + bj)^2 = a^2 - b^2 + 2abj.$$

Если $a = b$, то $C_{2,0}$ не зависит от величины шума. Далее кумулянт $C_{1,1}$ вычисляется по формуле

$$C_{1,1} = E_{1,1} = (a + bj)(a - bj) = a^2 + b^2.$$

Таблица 6

Значения кумулянтов при различных значениях ОСШ для 2-PSK

Кумулянт \ ОСШ	20 дБ	10 дБ	5 дБ	0 дБ
C20	-0,0387	-0,0345	-0,0248	-0,0018
C11	1,0090	1,0919	1,3213	1,9256
C40	-0,0095	0,0169	-0,1152	-0,2994
C31	0,0786	0,0402	0,0203	-0,0857
C22	-0,9976	-0,9818	-1,0387	-0,8104
C60	0,0122	0,0751	0,3629	2,5532
C51	0,0518	-0,0643	0,4749	0,1877
C42	-0,4330	-0,2126	-0,1819	0,0769
C33	3,9949	3,8893	4,1683	2,5281
C80	-0,9334	-0,7491	-2,1701	5,9027
C71	0,0799	-0,2008	2,2319	35,4588
C62	-0,5843	1,0589	-8,6745	-64,5972
C53	3,4696	-1,0747	-5,8719	-36,8123
C44	-15,3429	4,1966	84,7813	944,1348

Таблица 7

Значения кумулянтов при различных значениях ОСШ для 16-QAM

Кумулянт \ ОСШ	20 дБ	10 дБ	5 дБ	0 дБ
C20	-0,0152	-0,0043	-0,0137	-0,0552
C11	1,0092	1,1023	1,3261	1,9717
C40	-0,6600	-0,7131	-0,6053	-0,6686
C31	0,0348	0,0011	0,0131	-0,0657
C22	-0,6815	-0,6889	-0,7359	-0,5849
C60	-0,1782	-0,0133	-0,1394	0,2244
C51	2,0093	2,2433	1,8996	2,1324
C42	-0,1728	-0,0078	-0,1234	-0,1282
C33	2,0929	2,08168	2,3395	1,4557
C80	-13,0162	-15,8061	-12,422	-56,3791
C71	1,7873	0,5779	0,6476	15,4644
C62	-29,5409	-37,526	-47,6135	-126,581
C53	1,2313	-0,7299	-3,9638	-119,967
C44	19,3195	43,9592	142,9622	1157,298

Таблица 8

Основные параметры нейронной сети

Число слоев	3
Число входов	3, 9
Число нейронов в скрытом слое	40, 80, 120
Число нейронов в выходном слое	7
Максимальное число эпох	1000
Функция активации на скрытом слое	Сигмоидальная
Функция активации на выходном слое	Softmax

Следовательно, значение $C_{1,1}$ зависит от величины шума. Если уровень шума повышается, то $C_{1,1}$ тоже повышается, и наоборот.

В табл. 6, 7 представлены значения кумулянтов при различных значениях ОСШ для 2-PSK и 16-QAM. Значения кумулянтов $C_{1,1}$, $C_{7,1}$, $C_{6,2}$, $C_{5,3}$, $C_{4,4}$ (выделено жирным шрифтом) зависят от уровня шума, поэтому в качестве признаков нельзя их выбирать.

Кроме того, значения кумулянтов могут зависеть от шума при низких ОСШ из-за больших значений коэффициентов в формулах вычисления кумулянтов в табл. 5, т. е. при небольших изменениях значений моментов от шума следует значительное изменение кумулянтов.

Далее рассмотрим $C_{3,1}$ и $C_{1,3}$:

$$C_{3,1} = (a + bj)^3(a - bj);$$

$$C_{1,3} = (a + bj)(a - bj)^3.$$

$C_{1,3}$ является комплексным сопряженным $C_{3,1}$, поэтому значения действительных частей $C_{3,1}$ и $C_{1,3}$ равны.

Аналогично, из табл. 5 в качестве признаков выбираем девять кумулянтов: $C_{2,0}$, $C_{4,0}$, $C_{3,1}$, $C_{2,2}$, $C_{6,0}$, $C_{5,1}$, $C_{4,2}$, $C_{3,3}$, $C_{8,0}$.

4. Применение нейронной сети в задаче распознавания видов модуляции

Моделирование нейронной сети проводится в MATLAB с помощью Neural Network Toolbox. Входом нейронной сети является набор значений кумулянтов.

Структура нейронной сети. Основные параметры нейронной сети проведены в табл. 8.

Для составления базы данных для обучения нейронной сети были сгенерированы 7000 сигналов в MATLAB (1000 сигналов по каждому виду модуляции). Из них 5600 сигналов для обучения, 700 — для проверки и 700 — для тестирования. Входом является матрица размером 3×7000 или 9×7000 , а выходом является матрица размером 7×7000 .

Процесс обучения проводится в режиме offline, максимальное число эпох равно 1000 и алгоритм обучения является Levenberg — Marquardt [13].

Результаты тестирования. Результаты тестирования выполнены для двух вариантов: использование трех и девяти признаков.

Использование трех признаков. В табл. 9 приведены результаты распознавания в % при использовании трех признаков [5]: $C_{2,0}$, $C_{4,0}$, $C_{8,0}$; число нейронов в скрытом слое 40.

Процент распознавания при небольшом ОСШ (0,5 дБ) низкий, особенно для видов модуляции 16-QAM, 64-QAM (47,1 % и 57,1 %). Отсюда следует, что необходимо корректировать предельные значения в дереве логических решений в работе [5]. Этот результат показывает преимущество применения нейронной сети, поскольку здесь отсутствует необходимость выбора диапазона признаков, которая существует в классическом методе.

Использование девяти признаков. Набор состоит из следующих признаков $C_{2,0}$, $C_{4,0}$, $C_{3,1}$, $C_{2,2}$, $C_{6,0}$, $C_{5,1}$, $C_{4,2}$, $C_{3,3}$, $C_{8,0}$. Эти признаки выбраны согласно правилам в п. 3. Результаты распознавания, которые получают при числе нейронов в скрытом слое, равном 40, внесены в табл. 10.

Полученные результаты распознавания для большинства видов модуляции достаточно хорошие, однако результаты по распознаванию 16-QAM и 64-QAM еще не очень высокие, особенно при низких ОСШ.

В табл. 11 приведены результаты при использовании 80 нейронов в скрытом слое. Результаты стали хуже для всех видов модуляции.

Результаты, которые получаются при числе нейронов в скрытом слое, равном 120, внесены в табл. 12. Невысокие результаты только для видов модуляции 16-QAM и 64-QAM, при ОСШ = 0 дБ процент распознавания стал лучше, но при ОСШ = 5, 10, 20 дБ стал хуже, чем процент распознавания при использовании 40 нейронов в скрытом слое.

Из анализа приведенных выше таблиц следует вывод, что вероятность распознавания не прямо пропорциональна числу нейронов в скрытом слое. Единственным методом выбора правильного числа нейронов в скрытом слое является проведение экспериментов. При исполь-

зовании 40 нейронов в скрытом слое показан лучший результат. Хорошие результаты получены для видов модуляции 2-PSK, 4-PSK, 8-PSK, 2-FSK, 8-QAM, а для видов модуляции 16-QAM, 64-QAM результаты хуже.

Заключение

В данной работе использована нейронная сеть, структура которой подходит для распознавания видов цифровой модуляции: 2-PSK, 4-PSK, 8-PSK, 2-FSK, 8-QAM, 16-QAM, 64-QAM. Лучший результат показан при использовании девяти признаков и 40 нейронов в скрытом слое. Для видов модуляции 2-PSK, 4-PSK, 8-PSK, 2-FSK, 8-QAM результаты достаточно хорошие при любом значении ОСШ (0, 5, 10, 20 дБ), а для видов модуляции 16-QAM, 64-QAM результаты ухудшаются при ОСШ (0,5 дБ). Новизна статьи заключается в том, что найдены правила выбора признаков и подходящая структура нейронной сети, которые обеспечивают хорошие результаты распознавания. Дальнейшие исследования будут направлены на повышения точности распознавания видов модуляции 16-QAM, 64-QAM, а также на исследовании нейросетевого подхода для распознавания видов цифровой модуляции реальных модулированных сигналов.

Список литературы

1. **Wong M. L. D., Nandi A. K.** Automatic digital modulation recognition using artificial neural network and genetic algorithm // *Signal Processing*. 2004. Vol. 84. P. 351–365.
2. **Khan M. A., Bangash Y. A.** Automatic Modulation Recognition of Communication Signals // *Master Thesis Electrical Engineering*. 04-2012. P. 34–58.
3. **El-Khoribi R. A., Shoman M. A. I., Mohammed A. G. A.** Automatic Digital Modulation Recognition using Artificial Neural Network in Cognitive radio // *International Journal of Emerging Trends & Technology in Computer Science (IJETTCS)*. May – June, 2014. Vol. 3. Is. 3. P. 132–136.
4. **Nandi A. K., Azzouz E. E.** Modulation recognition using artificial neural networks // *Signal Processing*. 1997. Vol. 56. P. 165–175.
5. **Авельян Э. Д., Дам В. Н.** К выбору кумулянтных признаков в задаче распознавания видов цифровой модуляции радиосигналов // *Информатизация и связь*. 2015. № 4. С. 11–15.
6. **Young A. F.** Classification of digital modulation types in multipath environments // *Master's Thesis. Naval Postgraduate School, Monterey, CA 93943-5000, California*. June 2008. P. 1–65.
7. **Li J., Wang J., Fan X., Zhang Y.** Automatic Digital Modulation Recognition Using Feature Subset Selection // *Progress In Electro magnetics Research Symposium, Hangzhou, China*. March 24–28, 2008. P. 351–354.
8. **Kubankova A., Kubanek B.** Digital Modulation Recognition Based on Feature, Spectrum and Phase Analysis and its Testing with Disturbed Signals // *TELE-INFO 11 – Recent Researches in Telecommunications, Informatics, Electronics and Signal Processing*. 01. 2011. P. 162–166.
9. **Azarbad M., Hakimi S., Ebrahimzadeh A.** Automatic Recognition of Digital Communication Signal // *International Journal of Energy, Information and Communications*. November, 2012. Vol. 3, Is. 4. P. 21–33.
10. **Bagga J., Tripathi N.** Automatic modulation classification using statistical features in fading environment // *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*. August 2013. Vol. 2. Iss. 8. P. 3701–3709.
11. **Малахов А. Н.** Кумулянтный анализ случайных негауссовских процессов и их преобразований. М.: Советское радио. 1978. 376 с.
12. **Valkama M.** Complex-valued signals and systems — Basic principles and applications to radio communications and radio signal processing // *Dept. of Communications Engineering Tampere University of Technology*. 2008, pp. 1–62. <http://www.cs.tut.fi/TLT-9707/presentation/complex-Signal-and-Radios-short-2pp.pdf>.
13. **Suratgar A. A., Tavakoli M. B., Hoseinabadi A.** Modified Levenberg — Marquardt method for neural networks training // *International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering*. 2007. Vol. 1, N. 6. P. 1745–1747.

Таблица 9

Результаты при использовании трех признаков

Вид модуляции \ ОСШ	ОСШ			
	0 дБ	5 дБ	10 дБ	20 дБ
2-PSK	100	100	100	100
4-PSK	67,6	80,6	100	100
8-PSK	80,0	90,9	98,9	100
2-FSK	98,2	98,2	100	100
8-QAM	100	100	100	100
16-QAM	47,1	51,3	61,9	66,4
64-QAM	69,0	57,1	75,3	82,6

Таблица 10

Результаты распознавания при использовании 40 нейронов в скрытом слое

Вид модуляции \ ОСШ	ОСШ			
	0 дБ	5 дБ	10 дБ	20 дБ
2-PSK	100	100	100	100
4-PSK	94,2	100	100	100
8-PSK	95,0	98,9	100	100
2-FSK	97,2	97,9	100	100
8-QAM	100	100	100	100
16-QAM	55,6	66,4	87,4	88,0
64-QAM	56,7	72,9	81,1	87,5

Таблица 11

Результаты при использовании 80 нейронов в скрытом слое

Вид модуляции \ ОСШ	ОСШ			
	0 дБ	5 дБ	10 дБ	20 дБ
2-PSK	100	100	100	100
4-PSK	81,9	100	100	100
8-PSK	84,5	100	100	100
2-FSK	94,4	92,6	89,8	99,0
8-QAM	100	100	100	100
16-QAM	50,5	63,2	68,0	82,5
64-QAM	63,2	72,7	69,9	80,0

Таблица 12

Результаты при использовании 120 нейронов в скрытом слое

Вид модуляции \ ОСШ	ОСШ			
	0 дБ	5 дБ	10 дБ	20 дБ
2-PSK	100	100	100	100
4-PSK	90,5	97,2	100	100
8-PSK	87,4	100	100	100
2-FSK	96,9	100	100	100
8-QAM	100	100	100	100
16-QAM	59,4	74,1	75,9	81,9
64-QAM	63,7	70,9	71,9	77,2

Automatic Digital Modulation Recognition of Radio Signals Using Multilayer Neural Network with Cumulant Features

The article solves the problem of digital modulation recognition of radio signals based on the using multilayer neural network with cumulant features. Recognition is performed with the basic types of digital modulation 2-PSK, 4-PSK, 8-PSK, 2-FSK, 8-QAM, 16-QAM, 64-QAM. Features for the entrance of the neural network are cumulants $C_{2,0}$, $C_{4,0}$, $C_{3,1}$, $C_{2,2}$, $C_{6,0}$, $C_{5,1}$, $C_{4,2}$, $C_{3,3}$, $C_{8,0}$. MATLAB R2013b used to generate the data and perform the simulation, the article studied the Gaussian noise. The best result was shown using 9 features and 40 neurons in the hidden layer. These results are good enough, but recognition result of 16-QAM and 64-QAM is not very high, especially at low SNR. Increase of recognition results of 16-QAM, 64-QAM is a work in further studies.

Keywords: modulation, modulation recognition, IQ signals, moments, cumulants, Gaussian noise, signal to noise ratio (SNR), neural network, learning algorithm, Neural Network Toolbox

References

1. Wong M. L. D., Nandi A. K. Automatic digital modulation recognition using artificial neural network and genetic algorithm, *Signal Processing* 84, 2004, pp. 351–365.
2. Khan M. A., Bangash Y. A. Automatic Modulation Recognition of Communication Signals, *Master Thesis Electrical Engineering*, 04-2012, pp. 34–58.
3. El-Khoribi R. A., Shoman M. A. I., Mohammed A. G. A. Automatic Digital Modulation Recognition using Artificial Neural Network in Cognitive radio, *International Journal of Emerging Trends & Technology in Computer Science (IJETTCS)*. May – June, 2014, vol. 3, Is. 3, pp. 132–136.
4. Nandi A. K., Azzouz E. E. Modulation recognition using artificial neural networks, *Signal Processing* 56, 1997, pp. 165–175.
5. Aved'yan E. D., Dam V. N. K vyboru kumuljantnyh priznakov v zadache raspoznavanija vidov cifrovoj moduljacji radiosignalov, *Informatizacija i syjaz'*, 2015, no. 4, pp. 11–15. (Aved'yan E. D., Dam V. N. To choosing the cumulant features in the problem of recognition of types of digital modulation of radio signals. *Informatization and Communication*. 2015. № 4. P. 11–15.)
6. Young A. F. Classification of digital modulation types in multipath environments, *Master's Thesis. Naval Postgraduate School, Monterey*, CA 93943-5000, California, June 2008, pp. 1–65.
7. Li J., Wang J., Fan X., Zhang Y. Automatic Digital Modulation Recognition Using Feature Subset Selection, *Progress In Electro magnetic Research Symposium*, Hangzhou, China, March 24–28, 2008, pp. 351–354.
8. Kubankova A., Kubanek B. Digital Modulation Recognition Based on Feature, Spectrum and Phase Analysis and its Testing with Disturbed Signals, *TELE-INFO 11 – Recent Researches in Telecommunications, Informatics, Electronics and Signal Processing*, 01/2011, pp. 162–166.
9. Azarbad M., Hakimi S., Ebrahimzadeh A. Automatic Recognition of Digital Communication Signal, *International Journal of Energy, Information and Communications*. November, 2012, vol. 3, Is. 4, pp. 21–33.
10. Bagga J., Tripathi N. Automatic modulation classification using statistical features in fading environment, *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, August 2013, vol. 2, Is. 8, pp. 3701–3709.
11. Malahov A. N. *Kumuljantnyj analiz sluchajnyh negaussovyh processov i ih preobrazovanij*. Moscow: Sovetskoe radio, 1978, 376 p. (Malakhov A. N. Cumulant analysis of non-Gaussian random processes and their transformations. M.: Soviet Radio. 1978. 376 p.)
12. Valkama M. Complex-valued signals and systems — Basic principles and applications to radio communications and radio signal processing, *Dept. of Communications Engineering Tampere University of Technology*, 2008, pp. 1–62.
13. Suratgar A. A., Tavakoli M. B., Hoseinabadi A. Modified Levenberg — Marquardt method for neural networks training, *International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering*, 2007, vol. 1, no. 6, pp. 1745–1747.

Адрес редакции:

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала (499) 269-5510

E-mail: it@novtex.ru

Технический редактор *Е. В. Конова*.

Корректор *Е. В. Комиссарова*.

Сдано в набор 29.04.2016. Подписано в печать 22.06.2016. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ IT716. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-15565 от 02 июня 2003 г.

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.