

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

OFDM-модуляция в задаче автоматического распознавания вида цифровой модуляции

Исследуется задача включения OFDM-модуляции в набор распознаваемых видов цифровой модуляции радиосигналов с помощью многослойной нейронной сети. Распознавание проводится с использованием кумулянтных признаков при известном значении частоты несущего сигнала. Результаты тестирования показывают, что включение OFDM-модуляции в число распознаваемых видов цифровой модуляции не влияет на вероятности распознавания других видов модуляции, при этом вероятность распознавания OFDM-модуляции практически равна 100 %.

Ключевые слова: OFDM-модуляция, распознавание вида цифровой модуляции, моменты, кумулянты, гауссовый шум, многослойная нейронная сеть, характеристическая функция, IQ данные

Введение

Модуляция является обязательным и важным компонентом коммуникационной системы. Задача распознавания видов цифровой модуляции используется не только в гражданской, но и в военной области, например, в радиоразведке. Распознавание вида цифровой модуляции в зависимости от задач позволяет демодулировать сигнал, выполнить частотную синхронизацию и т. д. В работах [1–4] была исследована задача распознавания следующих видов одночастотной модуляции: M-PSK, M-FSK, M-QAM.

В работе [1] приведены результаты по распознаванию различных видов одночастотной модуляции (M-PSK, M-FSK, M-QAM), при этом вероятность распознавания не превышает 0,8 и вид OFDM-модуляции не включен в число распознаваемых. В работе [2] авторы тоже исследовали виды одночастотной модуляции и доказали, что нейросетевой подход с использованием кумулянтных признаков является наилучшим подходом в задаче распознавания видов цифровой модуляции.

В работе [6] авторы исследовали метод и разработали устройство распознавания видов модуляции. Этот метод позволяет распознавать только два класса сигналов: с одночастотной модуляцией и многочастотной модуляцией (OFDM). Сейчас OFDM (Orthogonal Frequency Division

Multiplexing) модуляцию широко применяют в проводной (ADSL, DVB-C2, PLC HomePlug AV, ...) и беспроводной связи (стандарты IEEE 802.11, HIPERLAN/2, LTE, WiMAX, ...). Основным преимуществом OFDM-модуляции по сравнению с видами одночастотной модуляции является ее способность противостоять сложным условиям в канале. Кроме того, низкая символьная скорость делает возможным использование защитного интервала между символами, что позволяет справляться с временным рассеянием и устранять межсимвольную интерференцию.

В настоящей работе исследуется актуальная задача включения OFDM-модуляции в набор распознаваемых видов цифровой модуляции радиосигналов, который был исследован в работе [5].

1. 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 и OFDM. Получатель принимает искаженный аддитивными комплексными гауссовыми белыми шумами $\xi(t)$ переданный сигнал $z(t)$, $t = \overline{0, T}$,

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

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

Принимаемый сигнал проходит через цифровой понижающий преобразователь (*digital down converter*), и на выходе этого преобразователя получаем сигналы I (синфазную составляющую) и Q (квадратурную составляющую), которые являются исходными данными для поставленной задачи. Получателю известна частота дискретизации сигнала, несущая частота и параметры OFDM-модуляции, которые представлены в разд. 4, табл. 4.

Получателю требуется распознавать используемый вид цифровой модуляции.

2. Основы OFDM-модуляции

OFDM-модуляция (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) — цифровая схема модуляции, которая использует большое число близко расположенных ортогональных поднесущих. OFDM-модуляция является специальным случаем передачи сигналов со многими несущими, когда данные из последовательного потока передаются одновременно (параллельно) через совокупность поднесущих. Каждая поднесущая модулируется по обычной схеме модуляции (фазовой или квадратурной амплитудной).

Для формирования OFDM-модуляции используется обратное быстрое преобразование Фурье (ОБПФ), а демодуляции — прямое быстрое преобразование Фурье (БПФ). На рис. 1, 2 представлены структурные схемы формирования OFDM-сигнала передатчика и приемника [7].

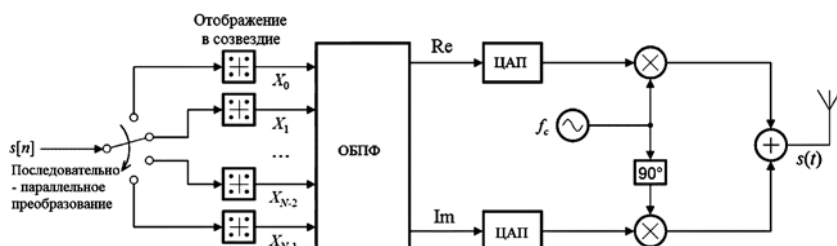


Рис. 1. Формирование OFDM-сигнала передатчика

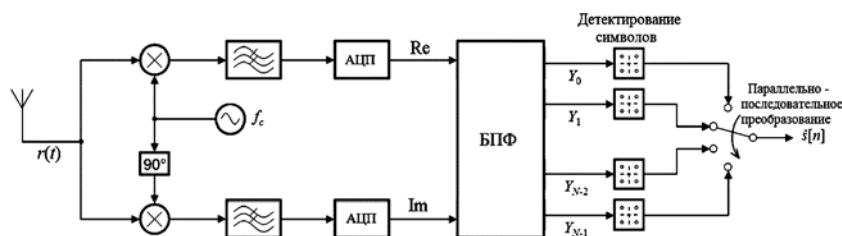


Рис. 2. Формирование OFDM-сигнала приемника



Рис. 3. Система автоматического распознавания вида цифровой модуляции

OFDM-символ состоит из отчетов сигнала после ОБПФ. Для исключения межсимвольной интерференции в каждый OFDM-символ вводится защитный интервал, длительность которого может составлять 1/4, 1/8, 1/16, 1/32 от длительности OFDM-символа: $T_s = T_d + T_g$, где T_s — длительность OFDM-символа; T_d — длительность символа после ОБПФ; T_g — длительность защитного интервала.

3. Система распознавания вида цифровой модуляции

В системе распознавания вида цифровой модуляции ключевым звеном является обученная многослойная нейронная сеть (МНС). Обучение МНС выполняется подачей на ее вход признаков, которые характеризуют конкретный вид модуляции, указанием вида модуляции, например, ее номера в списке распознаваемых видов модуляции, и последующей коррекцией памяти МНС. Выбор информативных признаков определяет успех или неуспех решения задачи распознавания. Предыдущие исследования [5] показали, что наиболее эффективным подходом к выбору информативных признаков служит кумулянтный подход, который и в настоящей работе применяется для распознавания OFDM-модуляции.

Модель системы распознавания вида цифровой модуляции представлена на рис. 3.

Система состоит из трех частей: выделение синфазной (I) и квадратурной (Q) составляющих сигнала; вычисление информативных признаков; нейронная сеть, обученная распознаванию всех видов цифровой модуляции, приведенных в работе [5], а также и OFDM-модуляции.

3.1. Выделение синфазной и квадратурной составляющих сигнала

На рис. 4 приведена схема обработки получаемого сигнала. Выходами блока являются IQ -сигналы, которые поступают в следующий блок для вычисления информативных признаков.

3.2. Информативные признаки

При конструировании кумулянтных признаков как цифровые модулированные сигналы, так и шумы в системе связи далее рассматриваются как стационарные случайные процессы. Характеристиками случайных процессов, в частности, служат мо-

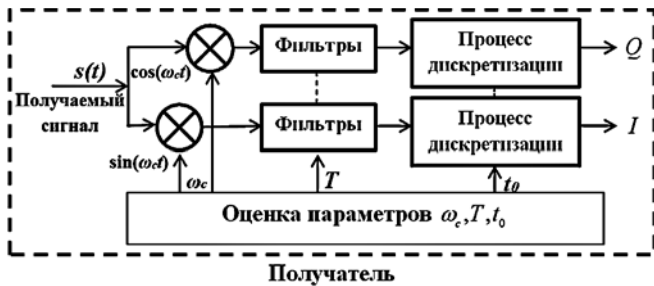


Рис. 4. Схема обработки получаемого сигнала

менты различных порядков и связанные с ними кумулянты (семиинварианты). В качестве информативных признаков далее используются кумулянтные признаки, определение которых основано на вычислении моментов случайного процесса. Поэтому далее приводится краткая информация о методах вычисления кумулянтов и их свойствах.

При использовании кумулянтных признаков получаемые сигналы преобразуются в низкочастотные сигналы (IQ -сигналы), что удобно для обработки цифровых сигналов.

Вычисление кумулянтов одномерного процесса. Пусть имеется случайная величина ξ с плотностью распределения $f_\xi(x)$.

Моментом первого порядка служит величина $a = \int_{-\infty}^{\infty} x f_\xi(x) dx$. Центрированные моменты порядка n вычисляют по формуле

$$E_n = \int_{-\infty}^{\infty} (x - a)^n f_\xi(x) dx.$$

Если момент первого порядка равен нулю, то моменты n -го порядка равны

$$E_n = \int_{-\infty}^{\infty} x^n f_\xi(x) dx.$$

Вычисление кумулянтов связано с характеристической функцией случайной величины ξ , которая определяется как математическое ожидание случайной величины $\eta = e^{iu\xi}$ по формуле

$$\varphi(u) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{iux} f_\xi(x) dx.$$

Характеристическая функция обладает целым рядом полезных и важных свойств, что и объясняет ту роль, которую она играет в теории математической статистики. Кумулянтами случайной величины служат коэффициенты C_n разложения логарифма характеристической функции $\varphi(u)$ в ряд Тейлора:

$$\ln \varphi(u) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n (iu)^n / n!,$$

где n — порядок кумулянта.

Известно, что между кумулянтами и моментами случайной величины существуют прямая и обратная зависимость [8]. Кумулянты вычисляются с помощью n -кратного дифференцирования характеристической функции. Ниже приведены формулы для вычисления первых восьми кумулянтов для одномерной центрированной случайной величины через соответствующие моменты [8]:

$$\begin{aligned} C_2 &= E_2; \\ C_3 &= E_3; \\ C_4 &= E_4 - 3E_2^2; \\ C_5 &= E_5 - 10E_3E_2; \\ C_6 &= E_6 - 15E_4E_2 - 10E_3^2 + 30E_2^3; \\ C_7 &= E_7 - 21E_5E_2 - 35E_4E_3 + 210E_3E_2^2; \\ C_8 &= E_8 - 28E_6E_2 - 56E_5E_3 - 35E_4^2 + \\ &+ 420E_4E_2^2 + 560E_3^2E_2 - 630E_2^4. \end{aligned} \quad (1)$$

Вычисление кумулянтов для двумерного процесса. Согласно рис. 2 в результате обратного преобразования Фурье получаемый OFDM-сигнал является комплексным, т. е. двухкомпонентным, и поэтому и моменты, и кумулянты должны быть вычислены для двумерной случайной величины.

Рассмотрим случайный центрированный комплексный модулированный сигнал $s(t) = I(t) + jQ(t)$ дискретного времени $t = 1, 2, \dots$ и комплексно-сопряженный к нему сигнал $\bar{s}(t) = I(t) - jQ(t)$. Таким сигналам соответствует двумерная плотность распределения вероятностей $f(x, y)$ и соответствующая двумерная характеристическая функция $\varphi(u, v) = \iint e^{j(ux+vy)} f(x, y) dx dy$.

Двумерная плотность распределения вероятностей $f(x, y)$ позволяет вычислить центрированные смешанные моменты $E_{k,l} = \iint x^k y^l f(x, y) dx dy$ и их оценки по формуле

$$\hat{E}_{k,l} = \sum_{t=1}^N s^k[t] \bar{s}^l[t] / N, \quad (2)$$

где N — число отсчетов процессов $s(t)$ и $\bar{s}(t)$. Значения смешанных моментов будут в дальнейшем использованы для вычисления соответствующих смешанных кумулянтов.

Смешанными кумулянтами процессов $s(t)$ и $\bar{s}(t)$ служат коэффициенты $C_{n,m}$ разложения логарифма характеристической функции $\varphi(u, v)$ в ряд Тейлора:

$$\ln \varphi(u, v) = \sum_{n,m=0}^{\infty} C_{n,m} (iu)^n (iv)^m / n! m!. \quad (3)$$

Порядком смешанного кумулянта $C_{n,m}$ является сумма $r = n + m$.

Формулы вычисления смешанных кумулянтов выводятся из формул кумулянтов одномерного процесса посредством формальной процедуры, приведенной в работе [8]. Суть ее покажем на примере вычисления смешанного кумулянта $C_{3,1}$, используя формулу для кумулянта $C_4 = E_4 - 3E_{2,0}^2$ из формул (1). Нетрудно показать, что для двухмерного случая данная формула имеет вид $C_{4,0} = E_{4,0} - 3E_{2,0}^2$, которую в формальном виде для первого процесса $s(t)$ запишем так:

$$C(r^4) = E(r^4) - 3[E(r^2)]^2, \quad (4)$$

где переменная r соответствует первому процессу $s(t)$. Далее к обеим частям формулы (4) применяем оператор дифференцирования $q \frac{d}{dr}$, где переменная q соответствует второму процессу $\bar{s}(t)$:

$$4C(r^3s) = 4E(r^3s) - 12E(r^2)E(rs);$$

$$C(r^3s) = E(r^3s) - 3E(r^2)E(rs).$$

Из второго соотношения следует формула для вычисления смешанного кумулянта $C_{3,1}$:

$$C_{3,1} = E_{3,1} - 3E_{2,0}E_{1,1},$$

в которой индексы соответствующих переменных совпадают со степенями переменных r и q .

Применяя этот формальный подход к другим кумулянтам одномерного процесса, можно получить формулы вычисления других смешанных кумулянтов. В табл. 1 представлены формулы для вычисления только тех кумулянтов до восьмого порядка, которые необходимы для решения задачи распознавания вида цифровой модуляции.

Формулы для вычисления кумулянтов

Кумулянт	Выражение через моменты
$C_{2,0}$	$C_{2,0} = E_{2,0}$
$C_{4,0}$	$E_{4,0} - 3E_{2,0}^2$
$C_{3,1}$	$E_{3,1} - 3E_{2,0}E_{1,1}$
$C_{2,2}$	$E_{2,2} - E_{2,0}E_{0,2} - 2E_{1,1}^2$
$C_{6,0}$	$E_{6,0} - 15E_{4,0}E_{2,0} - 10E_{3,0}^2 + 30E_{2,0}^3$
$C_{5,1}$	$E_{5,1} - 5E_{4,0}E_{1,1} - 10E_{3,1}E_{2,0} - 10E_{3,0}E_{2,1} + 30E_{2,0}^2E_{1,1}$
$C_{4,2}$	$E_{4,2} - E_{4,0}E_{0,2} - 8E_{3,1}E_{1,1} - 4E_{3,0}E_{1,2} - 6E_{2,2}E_{2,0} - 6E_{2,1}^2 + 6E_{2,0}^2E_{0,2} + 24E_{2,0}E_{1,1}^2$
$C_{3,3}$	$E_{3,3} - 3E_{3,1}E_{0,2} - E_{3,0}E_{0,3} - 9E_{2,2}E_{1,1} - 9E_{2,1}E_{1,2} - 3E_{2,0}E_{1,3} + 18E_{2,0}E_{1,1}E_{0,2} + 12E_{1,1}^3$
$C_{8,0}$	$E_{8,0} - 28E_{6,0}E_{2,0} - 56E_{5,0}E_{3,0} - 35E_{4,0}^2 + 420E_{4,0}E_{2,0}^2 + 560E_{3,0}^2E_{2,0} - 630E_{2,0}^4$

Значения кумулянтов являются комплексными числами. Основные отличия значений кумулянтов для различных видов цифровой модуляции проявляются в значениях их действительных частей, поэтому в качестве распознающего признака здесь приняты значения действительных частей кумулянтов.

Кумулянты чистого сигнала, шума и получаемого сигнала. Основной причиной использования в качестве информативных признаков в настоящей работе кумулянтных признаков является то, что кумулянты выше второго порядка для гауссового процесса равны нулю [9], а шумы в сетях связи в большинстве случаев носят гауссовый характер.

Рассмотрим структуру характеристической функции для случая, когда наблюдаемые комплексные процессы $s(t)$ и $\bar{s}(t)$ представляют собой сумму чистого сигнала $a(t)$ и распределенного по нормальному закону шума $\eta(t)$: $s(t) = a(t) + \eta(t)$. Характеристическая функция двумерной случайной величины $s(t)$ и $\bar{s}(t)$ равна

$$\varphi_{s, \bar{s}}(u, v) = M(e^{jus + jv\bar{s}}) = M(e^{ju(a+\eta) + jv(\bar{a}+\bar{\eta})}) = M(e^{j(ua+v\bar{a}) + j(u\eta+v\bar{\eta})}) = M(e^{j(ua+v\bar{a})} e^{j(u\eta+v\bar{\eta})}). \quad (5)$$

Если случайные процессы независимы, то математическое ожидание их произведения равно произведению их математических ожиданий, и, следовательно, характеристическая функция (5) равна произведению характеристических функций чистого сигнала и шума:

$$\varphi_{s, \bar{s}}(u, v) = \varphi_{a, \bar{a}}(u, v)\varphi_{\eta, \bar{\eta}}(u, v). \quad (6)$$

Поскольку кумулянтами являются коэффициенты разложения логарифма характеристической функции в ряд Тейлора, то из (6) следует, что кумулянт наблюдаемого процесса равен сумме кумулянта чистого сигнала $a(t)$ и кумулянта шума $\eta(t)$ в силу следующего выражения:

$$\ln \varphi_{s, \bar{s}}(u, v) = \ln \varphi_{a, \bar{a}}(u, v) + \ln \varphi_{\eta, \bar{\eta}}(u, v). \quad (7)$$

Соотношение (7) подтверждает тезис начала данного раздела о том, что в случае нормального шума значения кумулянтов наблюдаемого сигнала выше второго порядка не зависят от уровня шума, искажающего полезный сигнал.

Используя предложенные в работе [5] правила выбора кумулянтных признаков, в настоящей работе в качестве информативных признаков для решения задачи распознавания вида цифровой модуляции приняты девять смешанных кумулянтов: $C_{2,0}$, $C_{4,0}$, $C_{3,1}$, $C_{2,2}$, $C_{6,0}$, $C_{5,1}$, $C_{4,2}$, $C_{3,3}$, $C_{8,0}$.

Правилами, по которым выбраны кумулянты в качестве информативных признаков, являются следующие: а) действительные значения кумулянтов должны быть значимыми; б) значения кумулянтов должны быть различными для разных видов цифровой модуляции; в) значения кумулянтов не должны зависеть от уровня шума, т.е. значения кумулянтов не должны значительно изменяться, когда изменяются значения отношения сигнала к шуму.

3.3. Обучение нейронной сети

Программирование процессов распознавания видов цифровой модуляции выполнено в системе MATLAB с использованием пакетов прикладных программ Communications System Toolbox, Filter Design and Analysis Toolbox и Neural Network Toolbox, входящих в состав MATLAB Application Toolboxes. Для составления базы данных для обучения и тестирования нейронной сети были сгенерированы 8000 сигналов длительностью 3600 отсчетов (1000 сигналов по каждому виду модуляции). Из них 7200 сигналов для обучения и 800 — для тестирования. Входом в нейронную сеть служит девятимерный вектор, компоненты которого составлены из оценок кумулянтов, приведенных в табл. 1. Оценки кумулянтов вычисляются через оценки соответствующих моментов по формуле (2) для каждого входного сигнала. Таким образом, входной процесс обучения представлен матрицей размером 9×7200 , а выходной процесс — матрицей размером 8×7200 для восьми распознаваемых видов цифровой модуляции.

Процесс обучения проводится в режиме offline, максимальное число эпох равно 1000, алгоритм обучения — Levenberg — Marquardt. Ниже приведены параметры нейронной сети:

Число слоев	3
Число входов и нейронов в первом слое	9
Число нейронов в скрытом слое	80
Число нейронов в выходном слое	8
Максимальное число эпох	1000
Функция активации в скрытом слое . . .	сигмоидальная
Функция активации в выходном слое . .	сигмоидальная

4. Результаты тестирования при расширенном наборе распознаваемых видов цифровой модуляции

В табл. 2 представлены результаты распознавания без включения OFDM-модуляции [5].

Таблица 2

Результаты (в процентах) распознавания вида цифровой модуляции

Вид модуляции	2PSK	4PSK	8PSK	2FSK	8QAM	16QAM	64QAM
Вероятность распознавания, %	100	100	100	100	100	88,0	87,5

Таблица 3

Параметры OFDM-сигналов

Вариант	1	2	3	4
Число поднесущих	101	101	225	225
Длина ОБПФ	128	128	256	256
Схема модуляции в поднесущих	64-QAM	16-QAM	16-QAM	64-QAM
Частота дискретизации, Гц	839 680	839 680	839 680	839 680
Защитный интервал	16	16	32	32

Таблица 4

Результаты распознавания видов цифровой модуляции при различных вариантах OFDM-сигналов

Вид модуляции	Вероятность распознавания, %			
	1-й вариант	2-й вариант	3-й вариант	4-й вариант
2-PSK	100	100	100	100
4-PSK	100	100	100	100
8-PSK	100	100	100	100
2-FSK	100	100	100	100
8-QAM	100	100	100	100
16-QAM	88,1	86,2	80,5	84,5
64-QAM	90,7	90,8	88,1	88,2
OFDM	100	100	100	100

В табл. 3 приведены различные параметры OFDM-сигналов, которые используются для тестирования. Все тестируемые сигналы имеют отношение сигнала к нормальному шуму 20 дБ.

В табл. 4 представлены результаты тестирования при различных вариантах OFDM-сигналов.

Результаты тестирования, приведенные в табл. 2, 4, показывают, что включение вида OFDM в набор видов модуляции не влияет на вероятности распознавания других видов. При этом вероятность распознавания OFDM-модуляции практически равна 100 %.

Заключение

В данной работе приведены результаты расширения набора распознаваемых видов цифровой модуляции при включении OFDM-модуляции

в набор распознаваемых видов цифровой модуляции. Приведенные результаты показывают эффективность использования кумулянтов принимаемых сигналов в качестве признаков для обучения, тестирования и последующего функционирования многослойной нейронной сети в условиях гауссового шума. Следует отметить, что расширение набора распознаваемых видов цифровой модуляции при включении OFDM-модуляции практически не привело к уменьшению вероятности распознавания других видов цифровой модуляции, распознавание которых в большинстве случаев выполняется с высокой вероятностью, близкой к 100 %.

Все приведенные результаты получены при известном значении несущей частоты. В настоящее время проводятся исследования, направленные на решение задачи при неизвестном значении несущей частоты и применение полученных результатов в конкретной реальной системе коммуникации.

Список литературы

1. **Аджемов С. С., Терешонок М. В.** Способ и устройство автоматического распознавания типов манипуляции радиосигналов. Патент № RU2510077C2. 2014 г.
2. **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.
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. **Liu M., Zhao Y., Shi L., Dong J.** Research on recognition algorithm of digital modulation by higher order cumulants // Proc. of 4-th International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control. 2014. P. 686—690.
5. **Дам В. Н.** Автоматическое распознавание видов цифровой модуляции радиосигналов с помощью многослойной нейронной сети по кумулянтным признакам // Информационные технологии. 2016. № 7. Т. 22. С. 555—560.
6. **Peng Liu, Li Zou.** Apparatus and method for classifying modulation in multipath environments. Patent No: US8385473B2. 2010.
7. **Бакулин М. Г., Крейнделин В. В., Шлома А. М., Шумов А. П.** Технология OFDM: учеб. пособие для вузов. М.: Горячая линия — Телеком, 2017. 352 с.
8. **Кендалл М. Дж., Стьюарт А.** Теория распределений. Т. 1. М.: Наука, 1966. 587 с.
9. **Гнеденко Б. В.** Курс теории вероятностей. Изд. 6-е. М.: Наука, 1988. 447 с.

Dam Van Nhich, Graduate Student, damvan.nhich@gmail.com,
Department IIST FREC of Moscow Institute of Physics & Technology

The OFDM Modulation in the Problem of Automatic Modulation Recognition

In this paper is explored the problem of including OFDM modulation into the set of digital modulation types of radio signals using the multilayer neural network. Recognition is conducted using the cumulant features with known carrier frequency. The test results show that the inclusion OFDM modulation into the set of digital modulation types does not affect on the recognition probabilities of other types, while the recognizing probability of OFDM type is almost 100 %.

Keywords: OFDM modulation, digital modulation recognition, moments, cumulants, Gaussian noise, multilayer neural network, characteristic function, IQ data

References

1. **Adzhemow C. C., Tereschonok M. W.** *Sposob i ustrojstvo avtomatitscheskogo raspoznaniya tipov manipuljacii radiosignalov*, Patent No. RU2510077C2. 2014 (in Russian).
2. **Adzhemow C. C., Klenow N. W., Tereschonok M. W., Tschirow D. C.** *Metody raspoznaniya vidov cifrovoj moduljacii signalov w kognitiwnych radiosistemach*, *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Serija 3. Fisika. Astronomija*. 2015, no. 6, pp. 19—27 (in Russian).
3. **El-Khoribi R. A., Shoman M. A. I., Mohammed A. G. A.** Automatic Digital Modulation Recognition using Artificial Neural Network in Cognitive radio, *Proc. of International Journal of Emerging Trends & Technology in Computer Science (IJETTCs)*. May — June, 2014, vol. 3, is. 3, pp. 132—136.
4. **Liu M., Zhao Y., Shi L., Dong J.** Research on recognition algorithm of digital modulation by higher order cumulants, *Proc. of 4-th International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control*, 2014, pp. 686—690.
5. **Dam V. N.** Avtomaticheskoe raspoznaniye vidov cifrovoj moduljacii radiosignalov s pomosh'ju mnogoslojnoj nejronnoj seti po kumuljantnym priznakam, *Informacionnye tehnologii*, 2016, vol. 22, no. 7, pp. 555—560 (in Russian).
6. **Peng Liu, Li Zou.** Apparatus and method for classifying modulation in multipath environments, Patent No. US8385473B2. 2010.
7. **Bakulin M. G., Krejndelin V. V., Shloma A. M., Shumov A. P.** *Tehnologija OFDM, Uchebnoe posobie dlja vusov*, Moscow, Goryachaja linya — Telekom, 2017, 352 p. (in Russian).
8. **Kendall M. Dzh., St'juart A.** *Teoriya raspredelenij*, vol. 1, Moscow, Nauka, 1966, 587 p. (in Russian).
9. **Gnedenko B. W.** *Kurs teorii veroyatnostej*. Izd. 6-e, Moscow, Nauka, 1988, 447 p. (in Russian).