

DOI: 10.17725/rensit.2020.12.319

## Кумулянтные признаки для определения типа манипуляции сигналов

Курбаналиев В.К.

ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга, <http://www.cnirti.ru/>  
Москва 107078, Российская Федерация

E-mail: [vagdag05@mail.ru](mailto:vagdag05@mail.ru)

Поступила 12.10.2020, рецензирована 19.10.2020, принята 26.10.2020

Представлена действительным членом РАЕН А.А. Потаповым

**Аннотация:** Описан аппарат кумулянтного анализа применительно к задаче распознавания видов модуляции сигналов. Представлены результаты применения искусственных нейронных сетей в задаче автоматизации выявления признаков внутриимпульсной модуляции для идентификации (классификации) сигналов. Разработана математическая модель, описаны основные свойства данного типа сигналов и предложен метод, позволяющий определить тип манипуляции на основе вычисления информативных (кумулянтных) признаков. Моделирование проводилось в Matlab/Simulink.

**Ключевые слова:** фазовая манипуляция, искусственные нейронные сети, кумулянтный анализ  
УДК 621.37

*Для цитирования:* Курбаналиев В.К. Кумулянтные признаки для определения типа манипуляции сигналов. РЭНСИТ, 2020, 12(3):331-340. DOI: 10.17725/rensit.2020.12.331.

## Cumulative features for determining the type of signal manipulation

Vagid K. Kurbanaliev

A.I. Berg Central Research Institute of Radioengineering, <http://www.cnirti.ru/>  
Moscow 107078, Russian Federation

E-mail: [vagdag05@mail.ru](mailto:vagdag05@mail.ru)

Received October 12, 2020; peer reviewed October 19, 2020; accepted October 26, 2020

**Abstract:** This paper describes describes the apparatus of cumulant analysis in relation to the problem of recognizing the types of signal modulation. The article presents the results of using artificial neural networks in the task of automating the detection of intra-pulse modulation signs for the identification (classification) of signals. A mathematical model of a phase-shift keyed signal is developed, the main properties of this type of signals are described and a method is proposed that allows one to determine the type of signal manipulation based on the calculation of informative (cumulative) features. Simulation was carried out in Matlab/Simulink.

**Keywords:** phase-shift keying, artificial neural networks, cumulant analysis

UDC 621.37

*For citation:* Vagid K. Kurbanaliev. Cumulative features for determining the type of signal manipulation. RENSIT, 2020, 12(3):319-328. DOI: 10.17725/rensit.2020.12.319.

### Содержание

- |  |  |
|--|--|
| 1. Введение (320)  | 4. Искусственные нейронные сети (324)                        |
| 2. Математическая модель фазоманипулированного сигнала (320) | 5. Результаты моделирования сигналов в MatLab/Simulink (326) |
| 3. Методы распознавания видов модуляции сигналов (321)       | 6. Заключение (327)  |
|  | Литература (327)   |

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Автоматическое распознавание видов модуляции радиотехнических и радиосвязных сигналов является важной функцией в современных системах радиотехнической разведки и радиоэлектронной борьбы. Автоматическое распознавание видов модуляции в основном состоит из выделения признаков и классификации модуляции. Извлечение признаков модуляции состоит из серии преобразований и алгоритмов анализа во временной области, частотной области или частотно-временной области. Обработка классификации также состоит из различных алгоритмов распознавания образов и машинного обучения, глубокого обучения и алгоритмов кластеризации. Задача определения параметров сигналов в настоящее время актуальна по нескольким причинам: определение параметров поможет идентифицировать передающее устройство, в случае успешного распознавания вида модуляции можно восстановить передаваемое сообщение, а также появится возможность введения контролируемых помеховых модуляций и наведения активных помех для подавления радиоканалов локации и связи. Существует немало количество алгоритмов для определения параметров сигналов. Например, в [1,2] предложен метод распознавания вида модуляции по сигнальному созвездию. Причиной недостатков данного метода распознавания является низкая информативность, вероятность правильного распознавания сильно зависит от отношения сигнал/шум (ОСШ).

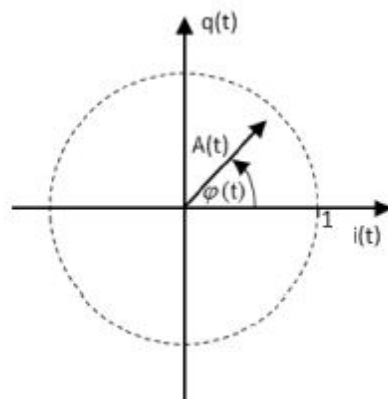
В данной статье рассматривается метод распознавания фазоманипулированных сигналов на основе кумулянтного анализа, основанного на использовании более устойчивых информативных признаков. Кумулянты (семиинварианты) – коэффициенты разложения в ряд Маклорена характеристической функции случайной величины. Данный метод позволит определить вид модуляции в условиях априорной неопределенности. Для автоматизации процесса идентификации

использованы нейронные сети. В рамках статьи рассматриваются фазоманипулированные сигналы (BPSK, QPSK и 8-PSK), т.е. сигналы, в процессе манипуляции которых происходит изменение фазы. Фазоманипулированные сигналы находят широкое применение в системах радиосвязи, так как они способствуют повышению степени помехоустойчивости системы и позволяют эффективно использовать диапазон частот радиоканала.

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА

Традиционные методы аналоговой модуляции изменяют высокочастотный сигнал только в одном измерении. Современные квадратурные (I/Q) модуляторы изменяют несущий ВЧ-сигнал в двух измерениях. Они формируют сигнал модуляции в комплексной форме, состоящей из суммы двух модулирующих сигналов  $i(t)$  и  $q(t)$ , где  $i(t)$  представляет собой синфазную составляющую, а  $q(t)$  – квадратурную составляющую. Ортогонально расположенные на квадратурной плоскости они формируют вектор с длиной  $A(t)$  и фазой  $\varphi(t)$ , см. **рис. 1**. Составляющие  $i(t)$  и  $q(t)$  нормированы к постоянной величине  $\leq 1$ .

Диаграмма сигнального созвездия обеспечивает графическое представление синфазной и квадратурной составляющих сигнала с цифровой модуляцией. На **рис. 2** показана диаграмма сигнального созвездия для двоичной фазовой манипуляцией (BPSK), 4-PSK (QPSK) и для модуляции 8-PSK при



**Рис. 1.** Вектор модуляции на I/Q-плоскости.

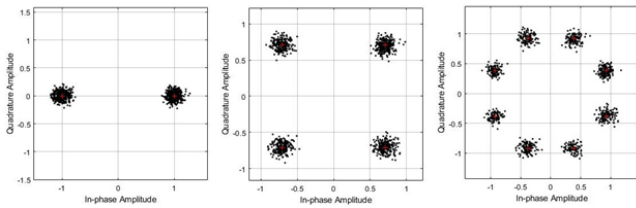


Рис. 2. Диаграмма сигнального созвездия для модуляции BPSK (слева), QPSK (посередине) и 8-PSK (справа).

ОСШ = 20 dB.

Цифровой сигнал колеблется между двумя фиксированными значениями сигнала, и считается, что это не модуляция, а манипуляция несущего колебания. Существуют три варианта манипуляции:

- амплитудная манипуляция (АМн или ASK);
- частотная манипуляция (ЧМн или FSK);
- фазовая манипуляция (ФМн или PSK).

При фазовой манипуляции фаза несущего колебания смещается в соответствии с цифровой последовательностью битов. Каждому передаваемому символу назначается абсолютный фазовый угол. Для лучшего разделения фазовые состояния обычно равномерно распределены на окружности 360°.

Для аналитического описания обычно используется следующее выражение:

$$V(t) = A \cos(\omega t + \theta), \tag{1}$$

где  $A$  – амплитуда,  $\omega$  – начальная частота,  $\theta$  – фаза сигнала.

При манипуляции прямоугольным сигналом сигнал BPSK выглядит следующим образом:

$$V(t) = \begin{cases} \hat{V}_c \cos \omega_c t & \text{для логической 1,} \\ -\hat{V}_c \cos \omega_c t & \text{для логического 0.} \end{cases} \tag{2}$$

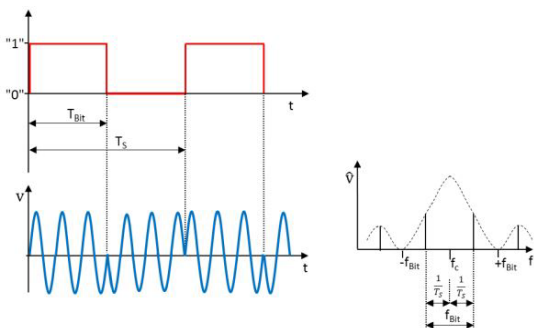


Рис. 3. Фазовая манипуляция в частотной и временной областях: для периодической битовой последовательности 1-0.

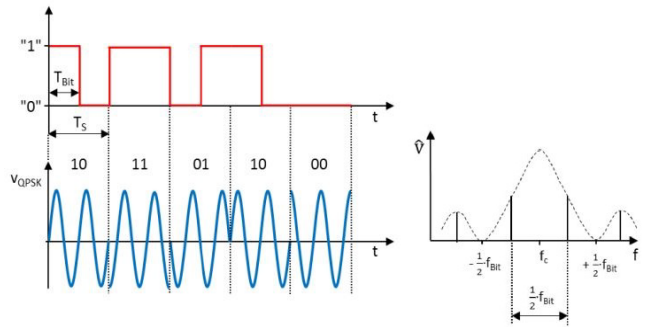


Рис. 4. Временные характеристики двоичного сигнала и несущего колебания QPSK и спектр сигнала.

где  $\hat{V}_c$  – амплитуда,  $\omega_c$  – круговая частота.

На рис. 3 показан сигнал данных и модуляционная составляющая с длительностью шага  $T_{bit}$  и периодом  $T_s$  во временной области, а также его спектр, где

$$f_{bit} = 1/T_{bit}.$$

На рис. 4 показан сигнала QPSK для символической последовательности 10 11 01 10 00. Для несущей может быть записано следующее выражение:

$$V_c(t) = \hat{V}_c \cos\left(\omega_c t + \frac{3\pi}{4} + \Delta\varphi\right). \tag{3}$$

Манипуляция осуществляется в соответствии с Таблицей 1.

### 3. МЕТОДЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ВИДОВ МОДУЛЯЦИИ СИГНАЛОВ

Для определения вида модуляции существует несколько подходов. Наиболее простой основан на проведении спектрального анализа. Умножение текущей фазы ФМн-сигнала на 2, 4 и т.д. позволяет последовательно снимать по одному уровню манипуляции. Простым способом такого умножения является возведение сигнала в соответствующую степень. Пусть, например, анализируемый сигнал описывается выражением (1), где в случае обработки BPSK-сигнала  $\theta = \{0, \pi\}$ .

Таблица 1

Таблица соответствия для модуляции QPSK

| Символ (двухбитовый) | $\Delta\varphi$ |
|----------------------|-----------------|
| 1 1                  | +45°            |
| 0 1                  | +135°           |
| 0 0                  | -135°           |
| 0 1                  | -45°            |

Возведем этот сигнал в квадрат

$$\begin{aligned} V^2(t) &= A^2 \cos^2(\omega t + \theta) = \\ &= A^2 \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(2\omega t + 2\theta) \right) = \\ &= A^2 \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(2\omega t) \right). \end{aligned}$$

Таким образом, мы получили выражение, описывающее сигнал с удвоенной частотой, и не содержащее информации об исходной фазе сигнала. Очевидно подобный подход можно использовать для снятия у QPSK, 8-PSK и т.п. сигналов.

Каждая операция возведения в степень приводит к соответствующей трансформации спектра анализируемого сигнала. В нем возникают гармоники удвоенной, учетверенной и т.д. центральной частоты, которые и являются признаками, характеризующими конкретный тип сигнала. Но основной недостаток данного подхода заключается в его высокой чувствительности к помехам, накладываемым на сигнал в процессе передачи. На практике может быть несложно определить частоту, соответствующую центральной гармонике, но при этом может быть невозможно определить их количество [3].

Наибольший интерес представляет подход определения вида модуляции сигнала, основанный на пороговом методе, классификации статистических признаков. В настоящее время информативные признаки можно разделить на спектральные и кумулянтные.

Спектральные признаки вычисляются на основе мгновенных значений параметров получаемого сигнала: мгновенной амплитуды, фазы и частоты. Спектральные особенности сигнала в задаче распознавания типов модуляции впервые были представлены в статье Е.Е. Azzouz, А.К. Nandi, опубликованной в 1995 г. и в монографии этих авторов, изданной годом позже [4,5]. Физической основой использования данной системы признаков являются особенности мгновенных значений амплитуды, фазы и частоты сигнала

при различных видах модуляции. Некоторые спектральные особенности используются для идентификации модуляции, которые предложены в литературе и приведены в **Таблице 2**.

Использование спектральных признаков имеют следующие недостатки: при невысокой точной синхронизации несущей частоты некоторые признаки теряют информативность; информативные признаки чувствительны к шуму и зависят от ОСШ [6].

Кумулянтные признаки дает алгоритм менее чувствительный к нежелательному шуму и отклонению от несущей частоты. Кумулянтные признаки вычисляются по низкочастотным данным на основе характеристических функций стационарных случайных процессов [7, 8].

Кумулянтные признаки двумерных случайных процессов выражаются через их смешанные моменты, которые определяются следующим образом: пусть имеется случайный стационарный процесс  $s(t), \bar{s}(t)$  – его сопряженный, тогда смешанный момент выражается формулой  $E_{k+n,n} = E[s^k(t) * \bar{s}^n(t)]$ , где  $k+n$  – порядок смешанного момента. В этом случае  $C_{k+n,n} = cum[s(t), \dots, s(t), \bar{s}(t), \dots, \bar{s}(t)]$  – выражение кумулянта порядка  $k+n$ . Кумулянты распределения во многих отношениях являются гораздо более информативными параметрами распределения, чем моменты. Это связано в основном с тем, что во многих практических важных случаях кумулянтами распределений в отличие от моментов можно пренебрегать. Более того, существуют такие распределения случайных величин, кумулянты которых, начиная с некоторого порядка, все обращают в нуль, в то время как их моменты не равны нулю. Например, для гауссова распределения отличны от нуля только первые два кумулянта, и вместе с тем ни один из моментов не равен нулю [9].

Кумулянты характеризуют статистическую связь между распределениями мгновенной фазы сигнала и могут быть выражены через совместные моменты согласно (4):

Таблица 2

Спектральные характеристики, используемые для классификации модуляции.

|  |  |
|--|--|
| Максимальное значение $\gamma_{\max}$ спектральной плотности мощности для нормализованной и центрированной мгновенной амплитуды принимаемого сигнала | $\gamma_{\max} = \frac{\max  DFT(A_{cn}(i)) ^2}{N_s},$ <p>где <math>DFT</math> - дискретное преобразование Фурье, <math>A_{cn}</math> - нормализованное и центрированное огибающей входного сигнала, <math>N_s</math> - количество отсчетов. Нормализация огибающей выполняется как <math>A_{cn} = A/\mu_A - 1</math>, где <math>\mu_A</math> - среднее значение мгновенных значений огибающей в выборке отсчетов длиной <math>N</math>.</p>   |
| Стандартное отклонение $\sigma_{ap}$ абсолютного значения центрированного нелинейного компонента мгновенной фазы                                     | $\sigma_{ap} = \sqrt{\frac{1}{N_c} \left( \sum_{A_n(i) > A_t} \varphi_{NL}^2(i) \right) - \frac{1}{N_c} \left( \sum_{A_n(i) > A_t}  \varphi_{NL}(i)  \right)^2},$ <p>где <math>N_c</math> - число образцов, удовлетворяющих условию <math>A_n(i) &gt; A_t</math>, где <math>A_t</math> - пороговое значение, которое фильтрует образцы с малой амплитудой сигнала из-за их высокой чувствительности к шуму, <math>\varphi_{NL}(i)</math> - нелинейный компонент мгновенной фазы.</p> |
| Стандартное отклонение $\sigma_a$ нормализованной и сосредоточенной мгновенной амплитуды.  | $\sigma_a = \sqrt{\frac{1}{L} \left( \sum_{A_n(i) > t_{th}} a_{cn}^2(i) \right) - \frac{1}{L} \left( \sum_{A_n(i) > t_{th}} \varphi_{cn}(i) \right)^2},$ <p>где <math>L</math> - продолжительность сигнала, <math>t_{th}</math> - пороговое значение</p>   |
| Стандартное отклонение $\sigma_{ap}$ значения нелинейного компонента мгновенной фазы   | $\sigma_{ap} = \sqrt{\frac{1}{N_c} \left( \sum_{A_n(i) > A_t} \varphi_{NL}^2(i) \right) - \frac{1}{N_c} \left( \sum_{A_n(i) > A_t} \varphi_{NL}(i) \right)^2},$ <p>Выражение для <math>\sigma_{ap}</math> полностью совпадает с выражением для <math>\sigma_{ap}</math> за исключением модуля мгновенной фазы</p>  |
| Стандартное отклонение $\sigma_{aa}$ абсолютных значений нормализованной и центрированной мгновенной амплитуды сигнала                               | $\sigma_{aa} = \sqrt{\frac{1}{N_c} \left( \sum_{i=1}^N A_{cn}^2(i) \right) - \frac{1}{N_c} \left( \sum_{i=1}^N  A_{cn}(i)  \right)^2},$ <p>где <math>A_{cn}</math> - нормированная и центрированная мгновенная амплитуда входного сигнала</p>  |
| Стандартное отклонение $\sigma_{af}$ абсолютных значений нормализованной и центрированной мгновенной частоты сигнала                                 | $\sigma_{af} = \sqrt{\frac{1}{N_c} \left( \sum_{A_n(t) > A_t} f_N^2(i) \right) - \frac{1}{N_c} \left( \sum_{A_n(t) > A_t}  f_N(i)  \right)^2},$ <p>где <math>f_N</math> - нормализованная частота</p>  |
| Коэффициент эксцесса $\mu_{42}^a$ для нормализованной и центрированной мгновенной амплитуды  | $\mu_{42}^a = \frac{E\{A_{cn}^4[n]\}}{\{E\{A_{cn}^2[n]\}\}^2}$   |
| Коэффициент эксцесса $\mu_{42}^f$ для нормализованной и центрированной мгновенной частоты  | $\mu_{42}^f = \frac{E\{f_N^4[n]\}}{\{E\{f_N^2[n]\}\}^2}$   |

$$C_{k+n,n} = cum[\underbrace{s, \dots, s}_k, \underbrace{\bar{s}, \dots, \bar{s}}_n] = \sum_{\forall \Omega} (-1)^{p-1} (p-1)! E \left[ \prod_{i \in \Omega_1} s_i \right] \dots E \left[ \prod_{i \in \Omega_p} s_i \right], \quad (4)$$

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

Для решения задачи классификации фазоманипулированных сигналов рассмотрим значения кумулянтов  $C_{20}$ ,  $C_{21}$ ,  $C_{40}$ ,  $C_{41}$ ,  $C_{42}$ .

Вычисление происходит по формулам 5-9 [10]:

$$C_{20} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N s^2(t) \quad (5)$$

$$C_{21} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |s(t)|^2 \quad (6)$$

$$C_{40} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N s^4(t) - 3C_{20} \quad (7)$$

$$C_{41} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N s^3(t) \bar{s}(t) - 3C_{20}C_{21} \quad (8)$$

$$C_{42} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |s(t)|^4 - |C_{20}|^2 - 2C_{21}^2. \quad (9)$$

Значения кумулянтов являются комплексными числами. Основные отличия значений кумулянтов для различных видов цифровой модуляции проявляются в значениях их действительных частей. Поэтому в качестве распознающих признаков далее приняты значения действительных частей кумулянтов.

Значения кумулянтов и моментов представлены в **Таблице 3** и **4** соответственно для трех видов манипуляции сигналов при отсутствии шума.

Таблица 3

Значения кумулянтов

|       | $C_{20}$ | $C_{21}$ | $C_{40}$ | $C_{41}$ | $C_{42}$ |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| BPSK  | 1        | 1        | -2       | -2       | -2       |
| QPSK  | 0        | 1        | 1        | 0        | -1       |
| 8-PSK | 0        | 1        | 0        | 0        | -1       |

Таблица 4

Значения моментов

|       | $M_{20}$ | $M_{21}$ | $M_{40}$ | $M_{41}$ | $M_{42}$ |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| BPSK  | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        |
| QPSK  | 0        | 1        | 1        | 1        | 1        |
| 8-PSK | 0        | 1        | 0        | 0        | 1        |

Как видно из Таблицы 3, моменты для одного вида манипуляции имеют практически одно и то же значение и не являются информативными.

Основное достоинство кумулянтов – высокая точность и однозначность классификации.

Принятие решения о классификации также может быть достигнуто с помощью деления на подгруппы. Совместное использование кумулянтов и моментов позволяет уменьшить вероятность ошибки как относительно только кумулянтного анализа, так и относительно применения только моментов.

#### 4. ИСКУССТВЕННЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ

С целью осуществления автоматизации процесса распознавания типа манипуляции сигналов могут быть применены искусственные нейронные сети [11-13].

На **рис. 5** представлена структура двухслойной нейронной сети.

В скрытом первом слое каждый нейрон обладает вектором весовых коэффициентов  $w^{(j,1)} = (w_0^{(j,1)}, w_1^{(j,1)}, w_2^{(j,1)}, \dots, w_n^{(j,1)})^T$ ,  $j = \overline{1, N_1}$  – количество нейронов в скрытом слое.

$$net^{(j,1)} = x^T w^{(j,1)} = w_0^{(j,1)} + \sum_{i=1}^N w_i^{(j,1)} x_i, \quad (10)$$

$$o^{(j,1)} = f(net^{(j,1)}),$$

– выход  $j$ -го нейрона скрытого слоя,  $x^T = (1, x_1, x_2, \dots, x_n)$  – вектор-строка входа,  $w^T = (w_0, w_1, \dots, w_n)$  – вектор-строка весовых коэффициентов,  $T$  – знак транспонирования,  $f(net) = f(w^T x)$  – нелинейная функция активации.

В выходном слое каждый  $k$  нейрон выходного слоя обладает вектором весовых коэффициентов  $w^{(k,2)} = (w_0^{(k,2)}, w_1^{(k,2)}, w_2^{(k,2)}, \dots, w_n^{(k,2)})^T$ ,  $k = \overline{1, N_2}$  – количество нейронов в выходном слое, которое, в частном случае, равно количеству классов в задаче распознавания образов,  $o^{(1)}$  – вектор выходов нейронов скрытого слоя, которые являются входами для выходного слоя [14, 15].

$$net^{(k,2)} = w^{(j,1)T} o^{(1)} = w_0^{(k,2)} + \sum_{i=1}^N w_j^{(j,1)} o^{(j,1)}, \quad (11)$$

$$o^{(k,2)} = f(net^{(k,2)}), \quad k = \overline{1, N_2}.$$

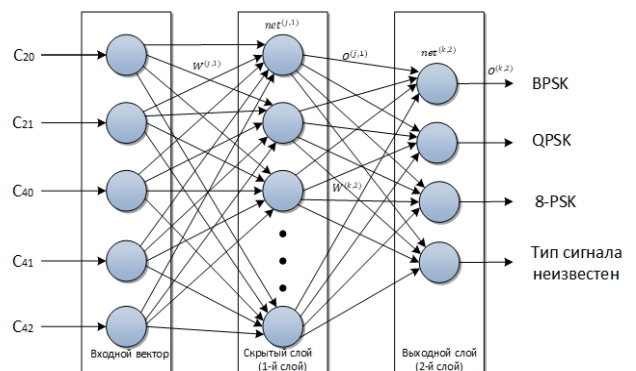


Рис. 5. Структура двухслойной нейронной сети.

Выход нейронной сети отражает тип манипуляции принятого сигнала.

В данной статье рассмотрены три типа манипуляции (BPSK, QPSK и 8-PSK), поэтому количество нейронов в выходном слое равно 3+1, с учетом неизвестного типа. Количество нейронов в скрытом слое 1 задано 10. Если принятый сигнал BPSK модуляции, то выход нейрона равен «1», а остальные равны 0.

Предварительное обучение нейронной сети осуществляется с использованием метода Левенберга-Маркварта (trainlm). Для обучения нейронной сети используется набор обучающих выборок, состоящий из двух составляющих: входной и целевой. Входная составляющая представляет собой значения кумулянтов, рассчитанные для сигналов с типами манипуляции BPSK, QPSK и 8-PSK, а целевая – желаемое состояние выходов нейронной сети, соответствующее выходной составляющей выборки. Для оценки качества обучения используется метод кросс-валидации (скользящий контроль). Последним действием подготовительного этапа является сохранение весовых связей нейронной сети в долговременной памяти [16, 17].

На рис. 6 представлен алгоритм обучения нейронной сети.

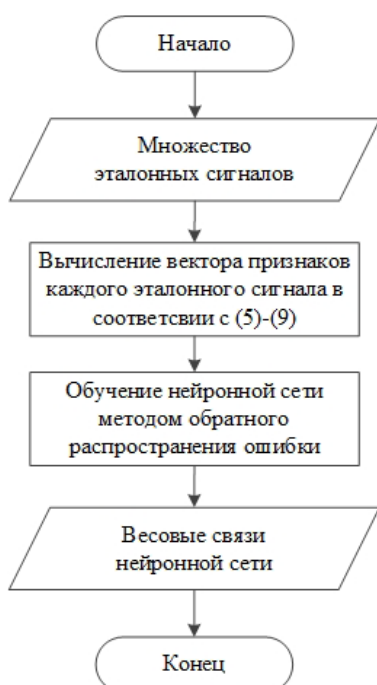


Рис. 6. Алгоритм обучения нейронной сети.

На этапе распознавания типа манипуляции сигнала, принятого с частотой дискретизации  $F_s$  в полосе частот  $\Delta F$ , имеющего продолжительность  $\Delta T$ , формируем вектор признаков  $C_{20}$ ,  $C_{21}$ ,  $C_{40}$ ,  $C_{41}$ ,  $C_{42}$  в соответствии с формулами (5)-(9). С этой целью из принятого сигнала формируем синфазную и квадратурные составляющие для последовательного вычисления кумулянтов. 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 типу манипуляции, выбор нейрона с максимальным значением  $F_{\text{вых}}$  в заданном интервале и будет определять искомый тип манипуляции. В противном случае считают, что тип манипуляции сигнала неизвестен, требуется повторная запись и анализ.

Обобщенный алгоритм распознавания типа манипуляции сигналов представлен на рис. 7.

Обучающее множество состояло из 324 сигналов при различных ОСЧ. Длина каждого сигнала составляла  $N = 1024$  отсчета.

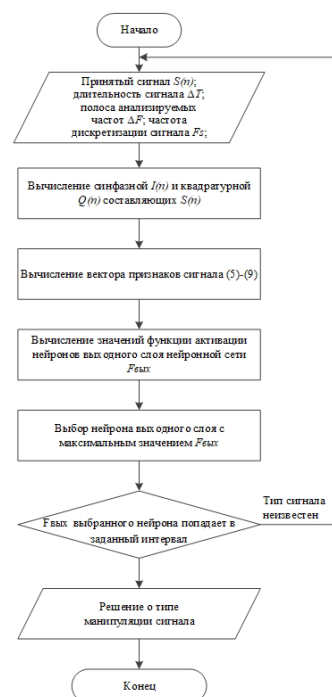


Рис. 7. Обобщенный алгоритм распознавания типа манипуляции сигналов.

На рис. 8, 9 представлены созданные математические модели для генерации исходных сигналов и для вычисления кумулянтов.

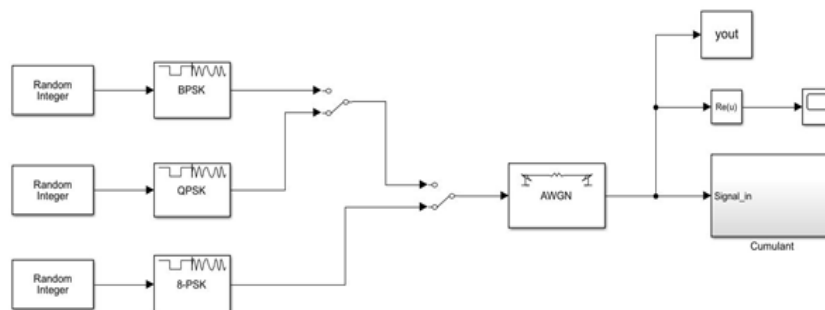


Рис. 8. Математическая модель для генерации исходных сигналов.

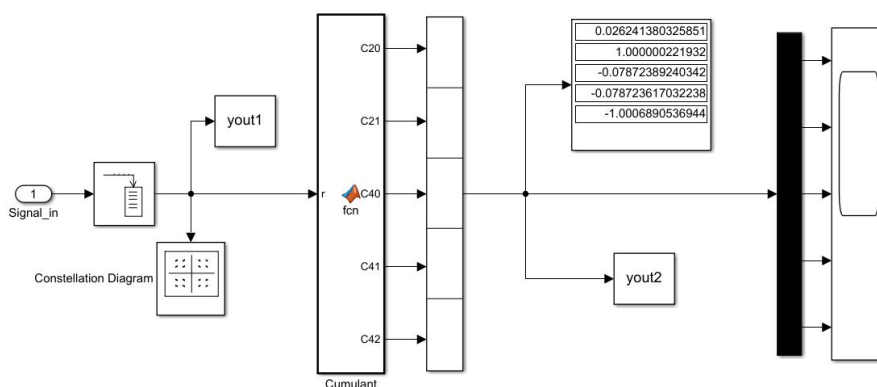


Рис. 9. Модель для вычисления кумулянтов.

### 5. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ В MATLAB/SIMULINK

Параметры нейронной сети приведены в таблице 4.

Оценка вероятностей распознавания типов манипуляции сигналов, полученных в среде имитационного моделирования MatLab/Simulink представлена в Таблице 5.

Как следует из таблицы при ОСШ не хуже 4-5 dB данная сеть будет работать очень хорошо, но при низких значениях ОСШ точность будет ухудшаться.

В результате проведения эксперимента (серии из  $n = 1000$  независимых наблюдений), случайная величина подчиняется биномиальному закону распределения со среднеквадратическим отклонением (СКО)  $\sigma = \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}}$ , где  $p$  - вероятность распознавания типа манипуляции. Погрешность измерения вероятностей распознавания составила  $\sim 1\%$ . В качестве критерия оценки эффективного принятия решения по распознаванию типа манипуляции сигналов выбрана условная вероятность для заданного ОСШ.

Таблица 4

Основные параметры нейронной сети.

|   |   |
|---|---|
| Количество слоев                                      | 2   |
| Количество входов                                     | 5   |
| Количество нейронов в скрытом слое                    | 10  |
| Количество нейронов в выходном слое                   | 3   |
| Функция активации в скрытом слое                      | Tansig (гиперболическая касательная сигмоидальная передаточная функция) |
| Функция активации в выходном слое                     | Purelin (линейная передаточная функция)                                 |
| Количество отсчетов сигнала для вычисления кумулянтов | 1024  |



Таблица 5

## Результаты распознавания

| ОСШ (dB) | Виды модуляции |      |       |
|----------|----------------|------|-------|
|          | BPSK           | QPSK | 8-PSK |
| 4        | 0.96           | 0.95 | 0.95  |
| 10       | 0.98           | 0.97 | 0.96  |
| 15       | 0.99           | 0.99 | 0.98  |

**6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Рассмотрен метод распознавания типов манипуляции сигналов на основе вычисления кумулянтных признаков для обучения нейронной сети. В статье исследованы кумулянты до четвертого порядка для распознавания трех видов манипуляции сигналов. Данный метод позволяет распознавать типы манипуляции с вероятностью не ниже 0.95 при отношениях сигнал/шум от 4 dB. Результаты моделирования показывают высокую эффективность данного подхода. Представлены аналитические выражения для вычисления кумулянтов и обоснована точность проведения эксперимента. Предварительный анализ метода показал, что подход, изложенный в работе, обладает свойствами непараметричности (робастности) и аналогичен кепстральному анализу. Реализация данного способа позволит расширить круг решаемых задач дистанционными методами и дополнить информацию, получаемую об источниках радиоизлучения.

В развитие темы исследования предполагается расширение количества распознаваемых видов модуляции и выбор значимых кумулянтов более высоких порядков и реализация данного метода на целевой платформе ПЛИС (FPGA) фирмы Altera, Xilinx. Также благодаря новой совокупности существенных признаков (комбинирование кумулянтов, моментов и спектральных характеристик) за счет расширения вектора признаков классифицируемых сигналов можно обеспечить повышение вероятности правильного распознавания видов модуляции сигналов.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Аджемов СС, Кленов НВ, Терешонок МВ, Чиров ДС. Методы распознавания видов цифровой модуляции сигналов в когнитивных радиосистемах. *Вестник*

*Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия*, 2015, 6:19-27.

- Velampalli C. Hierarchical blind modulation classification in the presence of carrier frequency offset. *Master's Thesis*. Communications Research Center, 2010:1-39.
- Степанов АВ, Матвеев СА. *Методы компьютерной обработки сигналов систем радиосвязи*. Москва, СОЛОН-пресс, 2003, 145 с.
- Azzouz EE, Nandi AK: Automatic identification of digital modulation types. *Signal Processing*, 1995, 47(1):55-69. DOI:10.1016/0165-1684(95)00099-2.
- Azzouz EE, Nandi AK. *Automatic Modulation Recognition of Communication Signals*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 1996.
- Dhamyaa H. Al-Nuaimi, Ivan A. Hashim, Intan S. Zainal Abidin, Laith B. Salman, Nor Ashidi Mat Isa. Performance of Feature-Based Techniques for Automatic Digital Modulation Recognition and Classification. *Electronics*, 2019, 8(12):1407. DOI: 10.3390/electronics8121407.
- Аведьян ЭД, Дам ВН. К выбору кумулянтных признаков в задаче распознавания видов цифровой модуляции радиосигналов *Информатизация и связь*, 2015, 4:11-15.
- Дам Ван Ньить. Нейросетевые технологии в задаче автоматического распознавания видов цифровой модуляции. *Диссертация...* Москва, МФТИ, 2018, 159 с.
- Малахов АН. *Кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований*. М., Сов. радио, 1978, 376 с.
- Zhechen Zhu, Asoke K. Nandi. *Automatic modulation classification principles, algorithms and*

- applications*. London, John Wiley & Sons, Ltd, 2015, 175 p.
11. Аджемов СС, Терешонок МВ, Чирнов ДС. Способ и устройство автоматического распознавания типов манипуляции радиосигналов. *Патент RU 2510077, МПК G06N 3/02*, 27.10.2013 Бюл. № 30.
  12. Елизаров ВВ, Касаткин АС, Наливаев АВ, Смирнов ПА, Шепилов АМ. Способ автоматического распознавания типа манипуляции радиосигналов. *Патент RU 2622846, МПК G06N 3/02*, 20.06.2017 Бюл. № 17.
  13. Колбаско ИВ, Квасов АВ, Юрьев ИА, Фесенко МВ. Способ распознавания типов манипуляции радиосигналов. *Патент RU 2682304, МПК G06N 3/02*, 18.03.2019 Бюл. №8.
  14. Хайкин С. *Нейронные сети: полный курс*. М., Изд. дом “Вильямс”, 2006, 1104 с.
  15. Галушкин АИ. *Нейронные сети: основные теории*. М., Горячая линия-Телеком, 2010, 480 с.
  16. Воронцов КВ. Комбинаторный подход к оценке качества обучаемых алгоритмов. В кн: *Математические вопросы кибернетики*. Под ред. О.Б. Лупанова. М., Физматлит, 2004, Том 13, с. 5-36.
  17. Лупанов ОБ (ред.) *Математические вопросы кибернетики*. М., Физматлит, 2004.
  18. *MathWorks* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/> (дата обращения: 01.09.2020).

**Курбанадиев Вагид Кадирбегович**  
*инженер*  
ЦНИРТИ им. акад. А.И. Берга  
20/9, Нов. Басманная ул, Москва, Россия  
[vagdag05@mail.ru](mailto:vagdag05@mail.ru).