

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.11.12>

УДК 621.376.3

**МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ ВИДА МОДУЛЯЦИИ СПЕКТРАЛЬНО-ЭФФЕКТИВНЫХ РАДИОСИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ КЛАССИФИКАЦИИ ОБРАЗОВ РАДИОСИГНАЛОВ В ПРОСТРАНСТВЕ ПАРАМЕТРОВ ФАЗОВЫХ ДИАГРАММ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА ЕВКЛИДОВОГО РАССТОЯНИЯ**

**Е. П. Кадуков, И. К. Уtimiшева**

**Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,  
197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13**

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2020 г.

**Аннотация.** Представлен метод распознавания вида модуляции (РВМ) спектрально-эффективных радиосигналов, формируемых на основе различного рода сглаживающих фильтров. Разработанный метод предназначен для автоматического радиомониторинга (РМ) параметров радиоизлучений без демодуляции с использованием цифровых осциллографов с целью контроля соблюдения дисциплины и регламента радиосвязи пользователями спутниковых систем связи (ССС). Распознавание вида модуляции предложено выполнять по результатам анализа параметров фазовых диаграмм (ФД) радиосигналов. В основе предложенного подхода к РВМ лежит идея отображения радиосигналов с модуляцией с непрерывным изменением фазы (СМНФ), характеризуемых множеством различных модуляционных параметров, в виде образов в пространстве параметров ФД. Разработан алфавит классов и предложен словарь признаков для множества альтернатив РВМ радиосигналов с модуляцией с непрерывным изменением фазы. Для оценки характера изменения параметров ФД радиосигналов получены эталонные описания конкретных классов априорного словаря, учитывающие изменения варьируемых параметров, формирующих множество альтернатив распознавания. Проведено оценивание влияния размера анализируемого фрагмента и отношения сигнал-шум (ОСШ) в условиях воздействия

аддитивного белого гауссовского шума, характерного для спутниковых каналов, на качество РВМ СМНФ. В статье обосновано содержание основных этапов классификации СМНФ в пространстве параметров ФД. В результате статистических экспериментов получены оценки вероятностей правильного РВМ СМНФ.

**Ключевые слова:** распознавания вида модуляции, спутниковые системы связи, непрерывное изменение фазы, фазовая диаграмма, распознавание образов.

**Abstract.** A method for automatic modulation classification (AMC) of spectral-effective radio signals generated based on various kinds of roll-off filters is presented. The developed method is intended for automatic radio monitoring (RM) of radio emission parameters without demodulation using digital oscilloscopes in order to control compliance with the discipline and radio communication regulations by users of satellite communication systems (SCS). It is proposed to AMC based on the results of the parameters analysis of the phase diagrams (PD) of radio signals. The proposed approach to AMC is based on the idea of displaying radio signals characterized by many different modulation parameters in the form of pattern in the parameter space of PD of continuous phase modulation radio signals (CPM). Developed an alphabet of classes and was proposed a dictionary of features for a variety of alternatives for CPM AMC. To assess the nature of changes in the parameters of the PD of radio signals, reference descriptions of specific classes of the a priori dictionary are obtained, taking into account changes in the variable parameters that form a set of recognition alternatives. The influence of the size of the analyzed fragment and the signal-to-noise ratio (SNR) under the influence of additive white Gaussian noise (AWGN), characteristic of satellite channels, on the quality for CPM AMC, has been estimated. The article substantiates the content of the main stages of the classification of CPM in the parameter space of PD. As a result of statistical experiments, estimates of the probabilities of correct for CPM AMC were obtained.

**Keywords:** automatic modulation classification, satellite communication systems, continuous phase modulation, phase diagram, pattern recognition.

## Введение

Развитие технологий передачи информации в ССС направлены на повышение помехоустойчивости и эффективности передачи информации. Важным направлением повышения эффективности использования частотного ресурса является увеличение пропускной способности канала при неизменной полосе частот за счет применения новых сигнально-кодовых конструкций, формируемых на основе различного рода сглаживающих фильтров, к числу которых относятся СМНФ, которые обладают высокими показателями и по помехоустойчивости, и по спектральной эффективности [1]. Форма используемого сглаживающего фильтра влияет на избирательность по соседнему каналу, что определяет взаимное воздействие смежных частотных каналов друг на друга (см. рис. 1), и оказывает влияние на качество предоставляемых услуг связи [2].

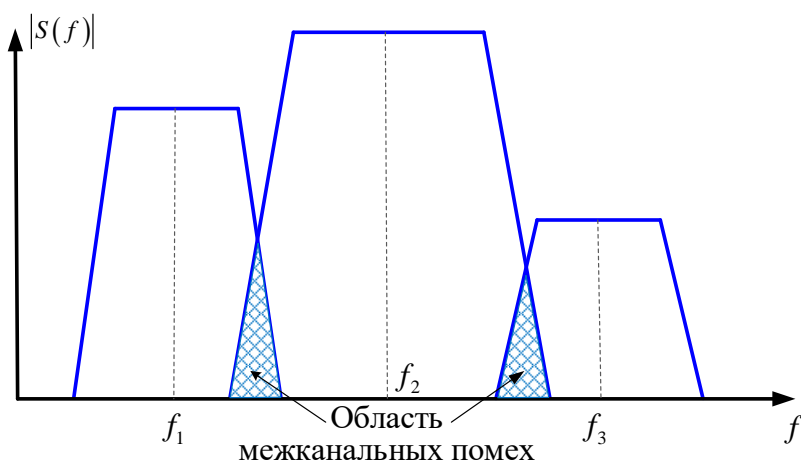


Рис. 1. Принцип возникновения межканальных помех.

В интересах соблюдения дисциплины и регламента радиосвязи необходимо осуществлять постоянный радиомониторинг радиоизлучений радиоэлектронных средств, заключающийся в сборе, обработке, анализе и хранении информации о состоянии радиочастотного спектра и выявлении признаков нарушений установленного порядка и правил его использования [3]. В рамках данной деятельности большое значение имеет РВМ радиосигналов, используемых в различных каналах передачи информации [4].

Современные методы распознавания видов модуляции (РВМ) радиосигналов, достаточно хорошо проработанные применительно к сигналам с традиционными видами модуляции, не позволяют преодолеть неопределенность вида и параметров модуляции для сигналов рассматриваемого класса. Кроме того, в современных системах связи и передачи данных вид манипуляции может меняться от сеанса к сеансу и даже в течение одного сеанса передачи информации. Таким образом, имеет место противоречие между большим многообразием видов и параметров модуляции, с одной стороны, и возможностями по их обработке, с другой [5].

Цель работы состоит в разработке метода РВМ СМНФ, устойчивого к возможным модификациям современных видов модуляции и к неопределенности параметров анализируемых излучений.

## 1. Теоретические предпосылки РВМ СМНФ по ФД

В разработанной модели радиосигналов с модуляцией с непрерывным изменением фазы [6] показано, что СМНФ может быть описан набором оценок параметров ФД, формируя при этом образ в многомерном пространстве параметров (см. рис. 2), который может быть наглядно представлен точкой в декартовой трехмерной системе координат.

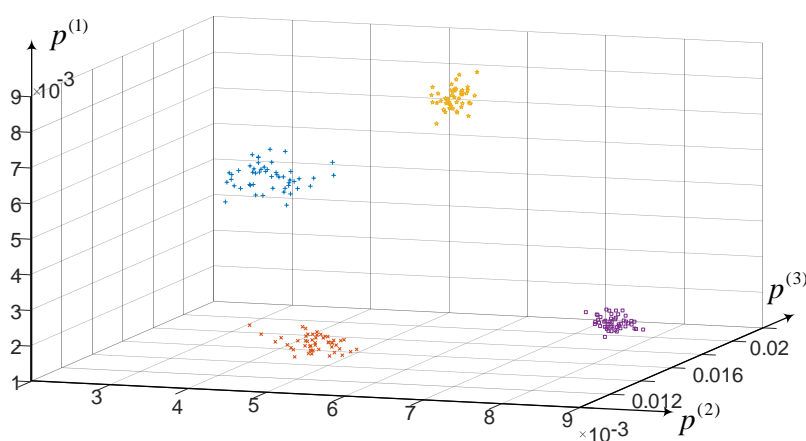


Рис. 2. Образы СМНФ в трехмерном пространстве параметров.

Число точек, характеризующих каждый СМНФ в пространстве параметров ФД, зависит от числа реализаций сигнала, образующих согласованно накопленный графический образ и рассчитанных как отношение интервала

наблюдения к некоторому количеству тактовых интервалов, при которых достигается требуемая точность оценок параметров ФД.

Проведенный в работе [6] анализ информативности параметров ФД сигналов, в рамках решаемой задачи, выявил следующие признаки, позволяющие провести классификацию параметров ФД внутри класса СМНФ с требуемой достоверностью, а именно:

$$\{x_{EW}, x_{ED}, x_{EH}\} = f_{\text{оц}}^{\text{инф}}(\xi_{\text{ФД}}),$$

где  $f_{\text{оц}}^{\text{инф}}(\xi_{\text{ph}})$  – функция оценки наиболее информативных параметров ФД;  $x_{EW}$  – ширина «чистого глаза»;  $x_{EH}$  – амплитуда «чистого глаза»;  $x_{ED}$  – «глазковая» задержка.

Физический смысл параметров ФД СМНФ поясняется на рис. 3.

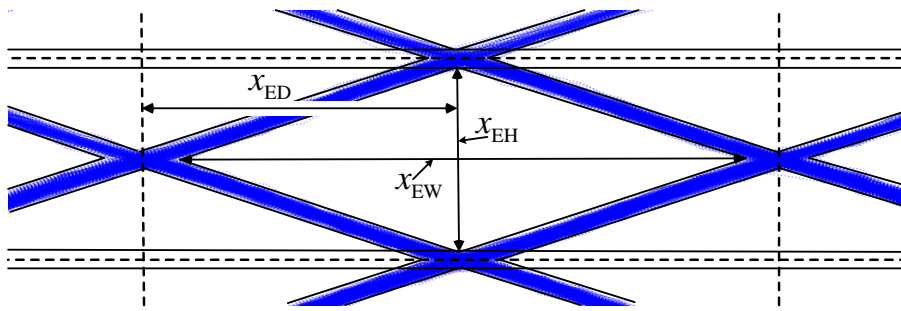


Рис. 3. Параметры  $x_{EW}, x_{ED}, x_{EH}$  ФД СМНФ.

Представим вектор значений оцененных параметров ФД СМНФ, следующим выражением

$$X^{\text{ФД}} = \langle x_{EW}^{(k)}, x_{ED}^{(k)}, x_{EH}^{(k)} \rangle.$$

Значения элементов  $X^{\text{ФД}}$  зависят от особенностей сигналообразования и характеристик среды распространения. В общем случае из-за воздействия различных дестабилизирующих факторов компоненты этого вектора являются случайными величинами.

Разрабатываемый метод распознавания вида параметров модуляции СМНФ базируется на сравнении текущих оценок множества параметров  $\tilde{X}^{\text{ФД}}$  с эталонными значениями (центрами масс).

Для получения представительских выборок реализаций вектора  $X^{ФД}$  в процессе формирования эталонов (центров масс) определялись значения признаков априорного словаря при различных формах частотных импульсов, формирующих множество альтернатив распознавания СМНФ (таблица 1) [6].

Таблица 1

Класс, $\Omega_n$	Форма элементарного импульса	Варьируемые параметры	
		Глубина межсимвольной связи	Значение параметра
$\Omega_1$	импульс, образованный ФНЧ Гаусса	$L \in \{1; 3\}$	$BT \in \{0, 2; 0, 3; 0, 4; 0, 5\}$ , $h = 0, 5$
$\Omega_2$	прямоугольный импульс	$L = 1$	$h \in \{0, 5; 0, 6; 0, 7; 0, 8; 0, 9\}$
$\Omega_3$	импульс, образованный ФНЧ типа «корень квадратный из приподнятого косинуса»	$L \in \{2; 3; 5\}$	$\alpha_{ПК} \in \{0, 3; 0, 35; 0, 4; 0, 45; 0, 5\}$ , $h \in \{0, 25; 0, 3; 0, 4; 0, 5; 0, 6(6)\}$

На основе данных, полученных в результате имитационного моделирования, для точек, характеризующих значения параметров ФД, в пространстве рассматриваемых признаков получены эталонные описания конкретных классов априорного словаря, учитывающие изменения варьируемых параметров, формирующих множество альтернатив распознавания (см. рис. 4).

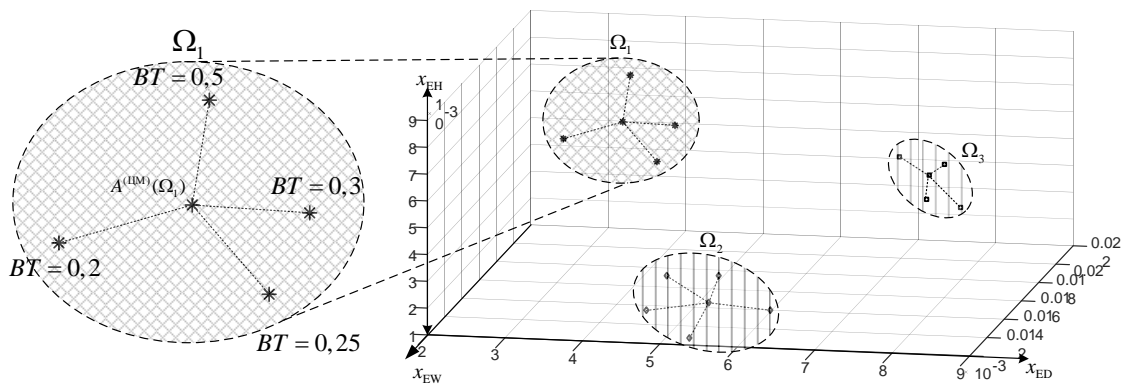


Рис. 4. Вычисление координат эталонов (центров масс) классов априорного словаря.

Для вычисления координат эталонов, в качестве которых рассматриваются

центры масс классов априорного словаря

$A^{(ЦМ)}(\Omega_i) [x^{(ЦМ)}(\Omega_i), y^{(ЦМ)}(\Omega_i), z^{(ЦМ)}(\Omega_i)]$  использованы выражения:

$$x^{(ЦМ)}(\Omega_i) = \frac{1}{N_{исп}} \sum_{i=1}^{N_{исп}} x_{EW_i}, y^{(ЦМ)}(\Omega_i) = \frac{1}{N_{исп}} \sum_{i=1}^{N_{исп}} x_{ED_i}, z^{(ЦМ)}(\Omega_i) = \frac{1}{N_{исп}} \sum_{i=1}^{N_{исп}} x_{EH_i},$$

где  $x^{(ЦМ)}(\Omega_i), y^{(ЦМ)}(\Omega_i), z^{(ЦМ)}(\Omega_i)$  – значения координат центра массы  $i$ -ого класса априорного словаря в пространстве признаков ФД;  $N_{исп}$  – число статистических испытаний.

В работе [6] показано, что объем данных, необходимый для описания эталонов СМНФ, должен достигать не менее 640 модуляционных символов.

## 2. Основные этапы метода РВМ СМНФ

С учетом сформированных теоретических положений, последовательность основных этапов разработанного метода представлена на рис. 5.



Рис. 5. Последовательность основных этапов метода РВМ СМНФ в пространстве параметров ФД.

**Этап 0.** Этап формирования эталонных образов СМНФ в пространстве параметров ФД выполнен применительно к множеству альтернатив СМНФ, представленных в таблице 1.

**Этап 1.** На данном этапе осуществляется предварительная обработка принимаемого СМНФ, которая включает следующие задачи:

- прием и обнаружение сигнала;
- оценивание отношения сигнал/шум;
- перенос сигнала на нулевую частоту и его представление в виде квадратур;
- оценивание тактовой частоты и синхронизация по тактовой частоте;
- отнесение принимаемого сигнала к классу СМНФ.

**Этап 2.** На данном этапе осуществляется формирование ФД по фазовым траекториям в тактовые интервалы времени.

**Этап 3.** На данном этапе осуществляется оценивание параметров фазовых диаграмм СМНФ, представленных на рис. 3.

**Этап 4** включает два подэтапа. На **подэтапе 4.1** осуществляется распознавание вида модуляции. На вход системы поступает образ СМНФ, принадлежность которого к тому или иному виду модуляции неизвестна. От этого образа измеряются расстояния согласно выражению:

$$d_i = \sqrt{\left(\tilde{x}_{EW} - x^{(ЦМ)}(\Omega_i)\right)^2 + \left(\tilde{x}_{ED} - y^{(ЦМ)}(\Omega_i)\right)^2 + \left(\tilde{x}_{EH} - z^{(ЦМ)}(\Omega_i)\right)^2}, i = 1(1)3,$$

до центров масс всех классов, и система относит к тому классу, расстояние до эталона которого минимально.

Распознавание образа СМНФ по критерию минимума евклидового расстояния [7] представлено на рис. 6.

Условие распознавания вида модуляции имеет вид:

$$\Omega_i : d = \min \{d(\Omega_i)\},$$

где  $d(\Omega_i)$  – расстояние от образа сигнала до центра масс  $i$ -ого класса СМНФ.

На **подэтапе 4.2** вычисляется мера близости образа рассматриваемого сигнала к множеству узловых точек сложной траектории, характеризующих альтернативы распознавания внутри класса СМНФ (см. рис. 7). Тогда



расстояние от неизвестного образа до координат реализаций определенного класса СМНФ рассчитывается аналогично выражению:

$$\omega_{i,j} : d = \min \{d(\omega_{i,j})\},$$

где  $d(\omega_{i,j})$  – расстояние от образа сигнала до центра масс  $j$ -ой реализации в пределах  $i$ -ого класса СМНФ.

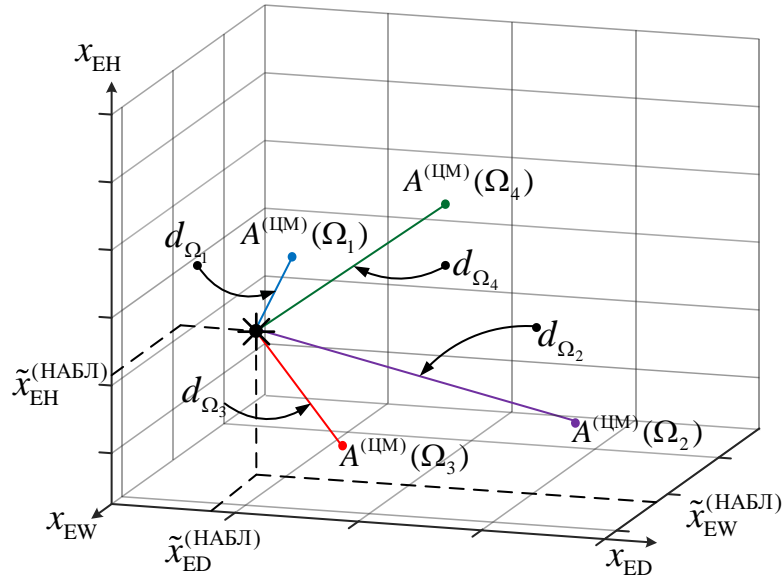


Рис 6. Результаты РВМ СМНФ.

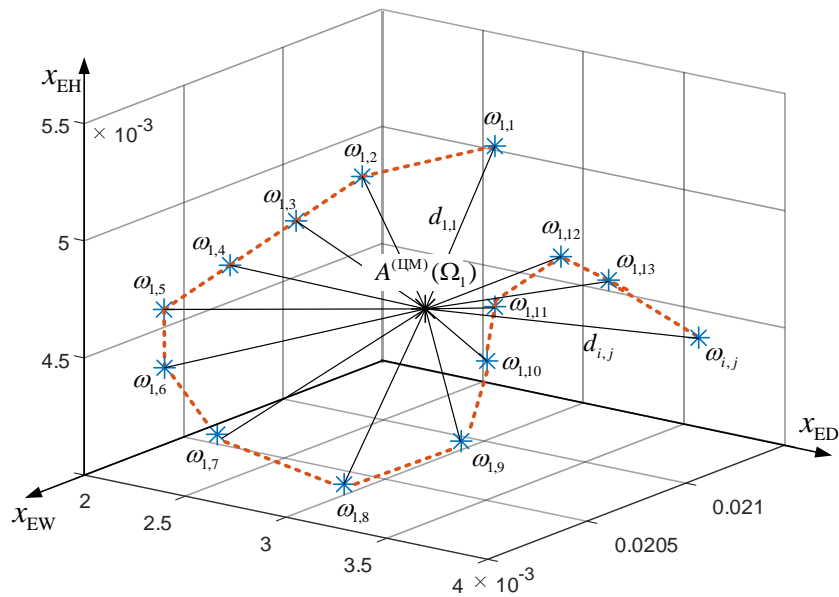


Рис. 7. Результаты оценивания параметров сигналообразования СМНФ.

### 3. Результаты экспериментальной проверки

Для вычисления вероятности положительного исхода работы итерационного алгоритма РВМ для каждого класса  $\Omega_i$  априорного словаря и всех ее реализаций  $\omega_{i,j}$  производилась серия из 10000 испытаний. Исходя из размера априорного словаря признаков [6] рассматриваются четыре гипотезы, представленных в таблице 2.

Таблица 2

Обозначение рассматриваемых события / гипотезы	Название режима
$C_1 / H_1$	сигнал принадлежит классу $\Omega_1$
$C_2 / H_2$	сигнал принадлежит классу $\Omega_2$
$C_3 / H_3$	сигнал принадлежит классу $\Omega_3$

Результаты оценивания вероятностей правильного РВМ СМНФ при значениях ОСШ, равного 12 дБ (таблица 3) и 8 дБ (таблица 4).

Таблица 3

	$H_1$	$H_2$	$H_3$
$C_1$	0,9991	0,0009	0
$C_2$	0,0002	0,9998	0
$C_3$	0,0008	0,00018	0,9974

Таблица 4

	$H_1$	$H_2$	$H_3$
$C_1$	0,9575	0,031	0,0115
$C_2$	0,0168	0,9775	0,0057
$C_3$	0,0349	0,029	0,9361

Полученные с помощью статистических наблюдений вероятностные характеристики выполнения этапов алгоритма, свидетельствуют о том, что разработанный метод позволяет осуществить РВМ в классе СМНФ с высокой достоверностью.

## **Заключение**

На основе классификации образов радиосигналов, отображенных в пространстве параметров ФД, разработан метод распознавания вида модуляции СМНФ. В результате выполнения этапов метода требуемая вероятность правильного распознавания вида модуляции СМНФ достигается при отношении сигнал/шум не менее 8 дБ. Разработанный метод позволяет получать достоверные данные о состоянии использования спектра в масштабе времени, близком к реальному, путем измерения характеристик излучений радиоэлектронных средств объектов контроля, необходимых и достаточных для обеспечения управления использованием радиочастотного спектра, включая соблюдение условий электромагнитной совместимости.

## **Литература**

1. Деев В.В. Методы модуляции и кодирования в современных системах связи. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2003. – 137 с.
2. Пузырев П.И. Исследование влияния помехи по соседнему каналу на вероятность ошибки приема частотно-манипулированного сигнала // Омский научный вестник. 2012. №3(113). С.344-348.
3. О концепции развития системы контроля за излучением радиоэлектронных средств и (или) высокочастотных устройств гражданского назначения в Российской Федерации на период до 2025 года: утвержден решением Государственной комиссии по радиочастотам при Минкомсвязи Российской Федерации от 04 июля 2017 г. № 17-42-06. Режим доступа: [www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71629318/](http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71629318/).

4. Кириллов С.Н., Покровский П.С. Алгоритм классификации вида модуляции неизвестного радиосигнала космических систем передачи информации // Вестник РГРТУ. 2013. № 2. С.3-11.
5. Обнаружение и анализ сигналов сложной структуры / Под ред. А.И. Замарин. – СПб.: МО РФ, 1996. – 552 с.
6. Кадуков Е.П. Модель радиосигналов с модуляцией с непрерывным изменением фазы в пространстве параметров фазовых диаграмм и комплекс информативных признаков для распознавания видов модуляции излучений спутниковых систем связи // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.7.12>
7. Дж. Ту, Гонсалес Р.К. Принципы распознавания образов / Пер. с англ. И.Б. Гуревича: под ред. Ю.И. Журавлева: М. Мир 1978. – 412с.

**Для цитирования:**

Кадуков Е.П., Утимишева И.К. Метод распознавания вида модуляции спектрально-эффективных радиосигналов на основе классификации образов радиосигналов в пространстве параметров фазовых диаграмм по критерию минимума евклидоваго расстояния. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.11.12>