

УДК: 621.376.3

DOI: 10.53816/23061456\_2021\_11-12\_37

**МЕТОДИКА РАСПОЗНАВАНИЯ ВИДА МОДУЛЯЦИИ РАДИОСИГНАЛОВ  
С НЕПРЕРЫВНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ФАЗЫ В СИСТЕМАХ  
РАДИОМОНИТОРИНГА**

**METHODOLOGY FOR RECOGNIZING OF THE TYPE OF CONTINUOUS PHASE  
MODULATION RADIOSIGNALS IN RADIOMONITORING SYSTEMS**

*Канд. техн. наук Е.П. Кадуков*

*Ph.D. E.P. Kadukov*

*ВКА им. А.Ф. Можайского*

Бурное развитие систем связи приводит к высокой нагрузке диапазонов радиочастот сигналами постоянно растущего количества радиоэлектронных средств, использующих спектрально-эффективные сигнально-кодовые конструкции. В этой связи национальной системой радиоконтроля реализуется комплекс мероприятий, направленных на соблюдение дисциплины и регламента радиосвязи, путем автоматизированного радиомониторинга излучений радиоэлектронных средств. В рамках данной деятельности особое значение имеет распознавание вида модуляции радиосигналов. В основе предложенного подхода лежит идея отображения радиосигналов, характеризуемых множеством различных модуляционных параметров, в виде образов в пространстве параметров фазовых диаграмм. В статье предложены основные этапы методики распознавания вида модуляции радиосигналов с непрерывным изменением фазы в системах радиомониторинга.

**Ключевые слова:** распознавание вида модуляции, сигналы с непрерывным изменением фазы, технический анализ, фазовые диаграммы, радиомониторинг, системы связи.

The rapid development of communication systems leads to a high load of radio frequency ranges with signals from an ever-growing number of radio electronic means using spectrally efficient signal-code structures. In this regard, the national radiomonitoring system implements a set of measures aimed at observing the discipline and regulations of radio communication by users of communication systems, through automated radiomonitoring of radio signals from radio electronic equipment. Within the framework of this activity, recognition of the type of modulation of radio signals is of particular importance. The proposed approach is based on the idea of imaging radio signals characterized by many different modulation parameters in the form of images in the parameter space of phase diagrams. The article proposes the main stages of the methodology for recognizing the type of continuous phase modulation radio signals in radiomonitoring systems.

**Keywords:** automatic modulation classification, continuous phase modulation radio signals, proximate analysis, phase diagrams, radiomonitoring, communication systems.

## Введение

Эффективное функционирование современного общества в большей степени зависит от степени развития средств телекоммуникаций. Анализ передаваемой информации показывает, что порядка 70 % трафика обеспечиваются радиорелейными, спутниковыми, сотовыми, транкинговыми и УКВ радиолиниями связи [1]. Техника и технологии радиосвязи непрерывно развиваются, расширяются используемые диапазоны радиочастот, общее количество радиоэлектронных средств (РЭС) увеличивается ежегодно на 5–8 % [2]. Таким образом, в настоящее время оказывается перекрытым практически весь пригодный для радиосвязи диапазон частот от десятков Герц до 20 ГГц и выше. В результате разработчикам приходится решать проблему более эффективного использования отведенных для систем связи участков спектра.

Стремление разработчиков аппаратуры связи наиболее эффективно использовать частотный ресурс канала связи, минимизировать межканальные искажения реализуется путем использования спектрально-эффективных сигнально-кодовых конструкций, формируемых на основе различного рода сглаживающих фильтров (Гаусса, типа «приподнятый косинус» (RC — raised cosine) и т.д.), к числу которых относятся сигналы с модуляцией с непрерывным изменением фазы (СМНФ) (CPM — Continuous Phase Modulation) [1, 3].

Форма применяемого сглаживающего фильтра оказывает влияние на избирательность по соседнему каналу, что определяет взаимное влияние смежных частотных каналов друг на друга (рис. 1) [4, 5], и, в конечном итоге, оказывает влияние на качество предоставляемых услуг связи.

В связи с этим, в интересах соблюдения дисциплины и регламента радиосвязи необходимо осуществлять постоянный радиомониторинг излучений РЭС объектов радиоконтроля (ОРК), заключающийся в сборе, обработке, анализе и хранении информации о состоянии радиочастотного спектра и выявлении признаков нарушений установленного порядка и правил его использования [1, 2]. Поставленная задача решается путем осуществления технического

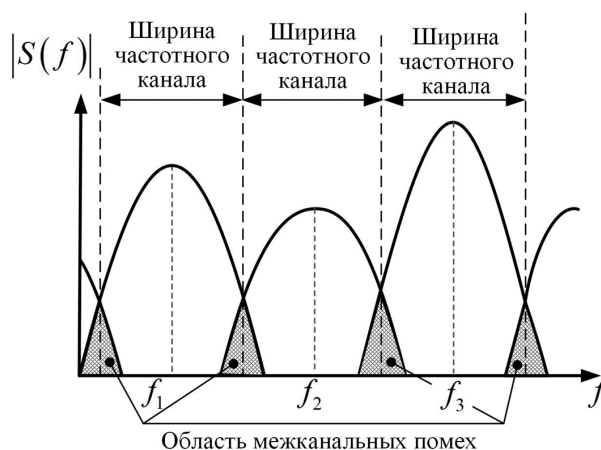


Рис. 1. Принцип возникновения межканальных помех

анализа (ТА) радиоизлучений РЭС, заключающегося в выявлении структуры сигнала по результатам измерений его параметров в целях определения вида сигнала, его характеристик и разработки способов получения информационного доступа, и установлении по имеющимся эталонным описаниям его принадлежности к определенному РЭС, и при наличии соответствующих априорных данных — к ОРК. В рамках данной деятельности большое значение имеет распознавание вида модуляции (РВМ) радиосигналов, используемых в различных каналах передачи информации [1].

Современные методы РВМ радиосигналов, достаточно хорошо проработанные применительно к сигналам с традиционными видами модуляции, не позволяют преодолеть неопределенность вида и параметров модуляции для сигналов СМНФ [6, 7]. Кроме того, в современных системах связи и передачи данных вид модуляции 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 [8].

В силу этого, цель статьи состоит в разработке методики РВМ СМНФ, которая расширит методическую и прикладную основу технического анализа сигналов в условиях радиомониторинга спектрально-эффективных сигнально-кодовых конструкций, формируемых на основе различного рода сглаживающих фильтров.

**Содержание основных этапов методики распознавания вида модуляции радиосигналов с непрерывным изменением фазы**

В работах [9] представлены основные компоненты научно-методического аппарата РВМ СМНФ, а именно: модели сигналов с непрерывным изменением фазы, отображенных в пространстве параметров фазовых диаграмм (ФД); метод распознавания вида модуляции спектрально-эффективных радиосигналов на основе классификации образов радиосигналов в пространстве параметров ФД по критерию минимума евклидового расстояния. Указанный научно-методический аппарат, а также практический опыт ТА радиоизлучений РЭС спутниковых систем

связи (ССС) позволили разработать методику распознавания вида модуляции радиосигналов с непрерывным изменением фазы. Основные этапы методики представлены на рис. 2.

Подготовительный этап. Исходными данными для данного этапа являются априорные сведения о множестве модификаций СМНФ, формирующих множество альтернатив распознавания [9]. С этой целью была проведена детализация СМНФ для наиболее часто встречающихся видов модуляции, применяемых производителями телекоммуникационного оборудования в соответствии с рекомендациями Консультативного комитета по космическим системам передачи информации (CCSDS — Consultative Committee for Space Data System) (таблица). Проведенный анализ практики при-

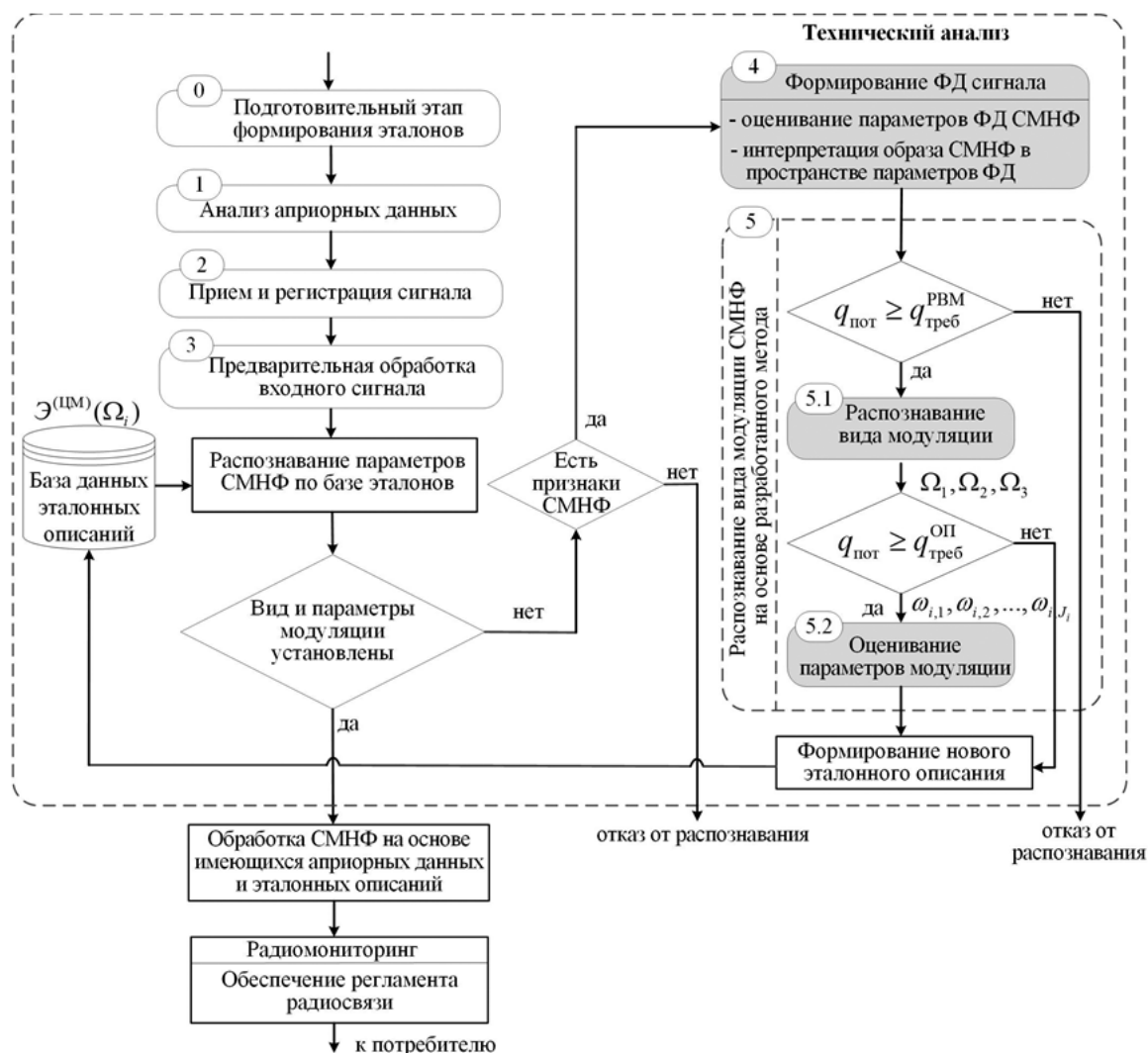


Рис. 2. Структурная схема методики РВМ СМНФ

Множество модификации СМНФ, формирующих множество альтернатив распознавания

Класс	Форма элементарного импульса и его аналитическое представление	Варьируемые параметры	
		число тактовых интервалов	значение параметра
$\Omega_1$	импульс, образованный ФНЧ Гаусса: $g(t) = \frac{Q\left(2\pi B\left(t - \frac{T}{2}\right)\right) - Q\left(2\pi B\left(t + \frac{T}{2}\right)\right)}{\sqrt{Ln2}}$ где $Q(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} \exp(-\frac{t^2}{2}) dt$	$L \in \{1; 3\}$	$BT \in \{0, 2(0,1)0, 5\}$ , $h = 0, 5$
$\Omega_2$	прямоугольный импульс: $g(t) = \begin{cases} \frac{1}{2LT}, & \text{при } 0 \leq t \leq LT, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$	$L = 1$	$h \in \{0, 5(0,1)0, 9\}$
$\Omega_3$	импульс, образованный ФНЧ типа «приподнятый косинус»: $g(t) = \begin{cases} \frac{1}{2LT} \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{LT}\right)\right), & \text{при } 0 \leq t \leq LT, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$	$L \in \{2; 3; 5\}$	$\alpha_{ПК} \in \{0, 3(0,05)0, 5\}$ , $h \in \{0, 25(0,01)0, 6(6)\}$

менения СМНФ позволил сформировать следующий алфавит классов,

$$\Omega^{\text{МНФ}} = \{\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3\}, \quad (1)$$

где  $\Omega_1$  — модуляция с минимальным сдвигом с использованием фильтра низких частот (ФНЧ) Гаусса;

$\Omega_2$  — частотно-модулированные сигналы с непрерывным изменением фазы;

$\Omega_3$  — частотно-модулированные сигналы с использованием ФНЧ типа «приподнятый косинус».

Таким образом, алфавит объектов одного класса, соответствующий конкретному виду модуляции СМНФ (1), примет вид

$$\Omega_i^{\text{МНФ}} = \{\omega_{i,1}, \omega_{i,2}, \dots, \omega_{i,j}, \dots, \omega_{i,J_i}\},$$

где  $J_i$  — мощность множества вариаций параметров в пределах  $i$ -го класса,  $i = \{1 \dots 3\}$ ;

$j$  — номер вариации параметров.

Как показано в работе [9], СМНФ может быть описан набором оценок параметров ФД, формируя при этом образ в многомерном пространстве параметров (рис. 3). Анализ информативности параметров ФД сигналов позволил выделить следующие наиболее информативные

параметры, обеспечивающие максимальную контрастность представления СМНФ рассматриваемого множества альтернатив, а именно:

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

где  $f_{\text{оц}}^{\text{инф}}(\xi_{\text{ФД}})$  — функция оценки наиболее информативных параметров ФД;

$x_{\text{EW}}$  — ширина «чистого глаза»;

$x_{\text{ED}}$  — амплитуда «чистого глаза»;

$x_{\text{EH}}$  — «глазковая» задержка.

Физический смысл параметров ФД СМНФ поясняется на рис. 4.

Тогда модель СМНФ на основе отображения радиосигналов в пространстве параметров ФД примет вид:

$$F^{(\text{ФД})} : U^{(\Omega_i^{\text{МНФ}})}(t) \rightarrow O^{(\Omega_i^{\text{МНФ}})}, \quad (2)$$

где  $F^{(\text{ФД})}$  — функция отображения СМНФ в пространстве параметров ФД;

$U^{(\Omega_i^{\text{МНФ}})}(t)$  — распознаваемые реализации  $i$ -го класса СМНФ;

$O^{(\Omega_i^{\text{МНФ}})}$  — образ  $i$ -го класса априорного алфавита видов модуляции СМНФ.

На основе данных, полученных в результате имитационного моделирования, для точек, характеризующих значения параметров

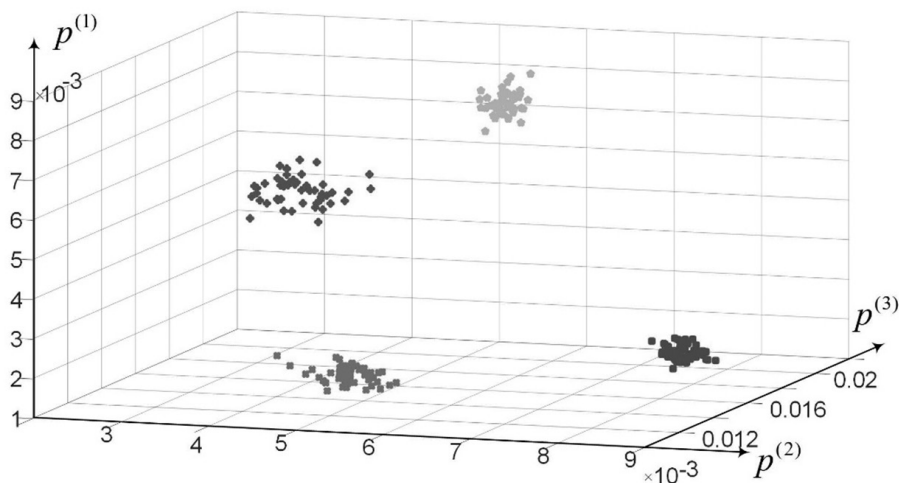


Рис. 3. Образы СМНФ в трехмерном пространстве параметров ФД

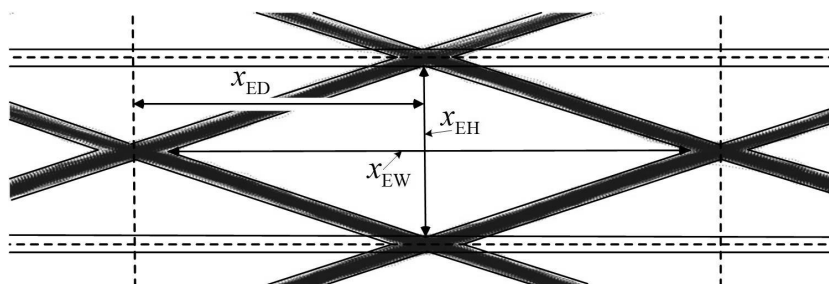


Рис. 4. Фазовая диаграмма СМНФ по модулю  $2\pi$

ФД, в пространстве рассматриваемых признаков вычисляются эталонные описания конкретных классов априорного словаря, учитывающие изменения варьируемых параметров, формирующих множество альтернатив распознавания. С этой целью вычислены координаты центров масс классов априорного словаря  $\mathcal{E}^{(\text{ЦМ})}(\Omega_i) [x^{(\text{ЦМ})}(\Omega_i), y^{(\text{ЦМ})}(\Omega_i), z^{(\text{ЦМ})}(\Omega_i)]$  (рис. 5), используя выражения:

$$x^{(\text{ЦМ})}(\Omega_i) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_{\text{исп}}} x_{\text{EW}_i},$$

$$y^{(\text{ЦМ})}(\Omega_i) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_{\text{исп}}} x_{\text{ED}_i},$$

$$z^{(\text{ЦМ})}(\Omega_i) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_{\text{исп}}} x_{\text{EH}_i}.$$

где  $x^{(\text{ЦМ})}(\Omega_i), y^{(\text{ЦМ})}(\Omega_i), z^{(\text{ЦМ})}(\Omega_i)$  — значения координат центра массы  $i$ -го класса априорного словаря в пространстве признаков ФД;

$N$  — мощность множества вариаций алфавита классов,  $n \in \{1, N\}$ .

Этап 1. Исходными данными для этого этапа являются априорные данные о принадлежности анализируемого радиосигнала определенному КА-ретранслятору, принадлежность которого к той или иной ССС установлена ранее, тип поляризации электромагнитного излучения, частотный диапазон, в котором производится анализ радиоизлучений, а также несущая частота анализируемого радиоизлучения РЭС ОРК.

Этапы 2–3. На данных этапах осуществляется обнаружение и прием, а также предварительная обработка принимаемого радиосигнала, которая включает следующие задачи:

- оценивание отношения сигнал/шум;
- перенос сигнала на нулевую частоту и его представление в виде квадратур;

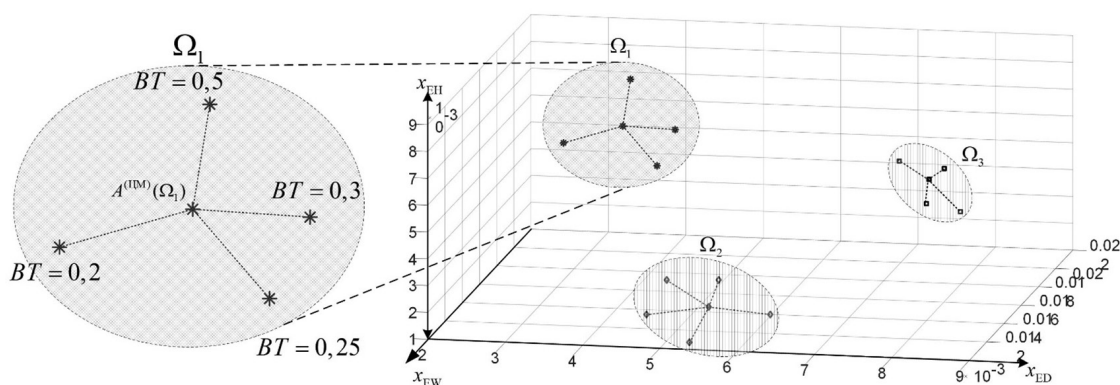


Рис. 5. Вычисление координат центров масс классов априорного словаря

- оценивание тактовой частоты и синхронизация по тактовой частоте;
- отнесение принимаемого сигнала к классу СМНФ.

Операции, выполняемые на данных этапах методики, достаточно хорошо изучены и проработаны в научной литературе, а также не представляет сложности их практическая реализация на современном уровне научно-технического развития. Вопросы приема и предварительной фильтрации входного сигнала рассмотрены, например, в работах [6, 7]. Вопросы предварительной обработки входного сигнала детально проработаны в работах [7, 8].

В то же время, применение сглаживающих ФНЧ в СМНФ приводит к «уничтожению» символьных переходов, от которых зависит работа множества схем тактовой синхронизации. Поэтому для решения задачи оценивания фазы тактового колебания воспользуемся схемой по критерию максимума средней энергии модуляционных символов в тактовые моменты времени [7].

Для реализации тактовой синхронизации требуется выполнить комплекс действий:

- расширение количества возможных тактовых моментов методом интерполяции входного сигнала  $\tilde{U}_{[K,L]}^{(инт)}$ ;
- накопление значений средней энергии модуляционных символов в результате последовательного сдвига тактовых моментов времени,  $U_{\langle K \rangle}^{(инт)}$ ;
- определение моментов тактирования по критерию максимума средней энергии модуляционных символов в тактовые моменты времени,  $\max(U_{\langle K \rangle}^{(инт)})$ ;
- тактирование в рассчитанные моменты времени,  $\tilde{U}_{k_{\max.\langle L \rangle}}^{(инт)}$ .

Таким образом, в процессе первичной обработки сигнала устраняется неопределенность тактовой синхронизации, необходимой для формирования ФД. Сигнал  $\tilde{U}_{k_{\max.\langle L \rangle}}^{(инт)}$ , интерполированный в тактовые моменты времени, соответствующие максимуму индикаторной функции  $\max(U_{\langle K \rangle}^{(инт)})$  поступает на вход этапа формирования фазовых диаграмм СМНФ.

Этап 4. Совокупности сигнала  $\tilde{U}_{k_{\max.\langle L \rangle}}^{(инт)}$ , формируемые наложением собственных реализаций сигнала, сдвинутых относительно друг друга на интервал корреляции, образуют согласованно накопленный графический образ. После формирования ФД на данном этапе оцениваются значения их параметров  $x_{EW}, x_{ED}, x_{EH}$ . Затем радиосигнал СМНФ отдельного класса интерпретируется таким образом в пространстве параметров ФД с учетом выражения (2) в виде:

$$F^{(ФД)} : \tilde{U}_{k_{\max.\langle L \rangle}}^{(инт)} \rightarrow O^{(\Omega_i^{МНФ})}.$$

Этап 5 включает два подэтапа. На подэтапе 5.1 осуществляется распознавание вида модуляции СМНФ. На вход системы поступает образ СМНФ, принадлежность которого к тому или иному виду модуляции неизвестна. От этого образа измеряются расстояния согласно выражению:

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

до центров масс всех классов, и система относит к тому классу, расстояние до эталона которого минимально (рис. 6).

Условие распознавания вида модуляции имеет вид:

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

где  $d(\Omega_n)$  — расстояние от образа сигнала до центра масс всех  $n$ -го класса СМНФ.

На подэтапе 5.2 вычисляется мера близости образа рассматриваемого сигнала к множеству узловых точек сложной траектории, характеризующих альтернативы распознавания внутри класса СМНФ (рис. 7). Тогда расстояние от неизвестного образа до координат реализаций определенного класса СМНФ рассчитывается аналогично выражению (3).

Условие оценивания параметров сигналообразования СМНФ имеет вид:

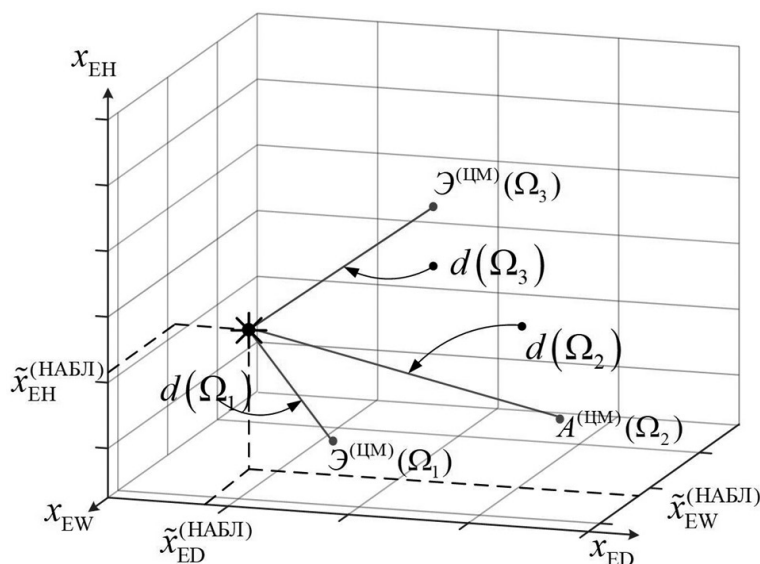


Рис. 6. Результаты распознавания вида модуляции СМНФ

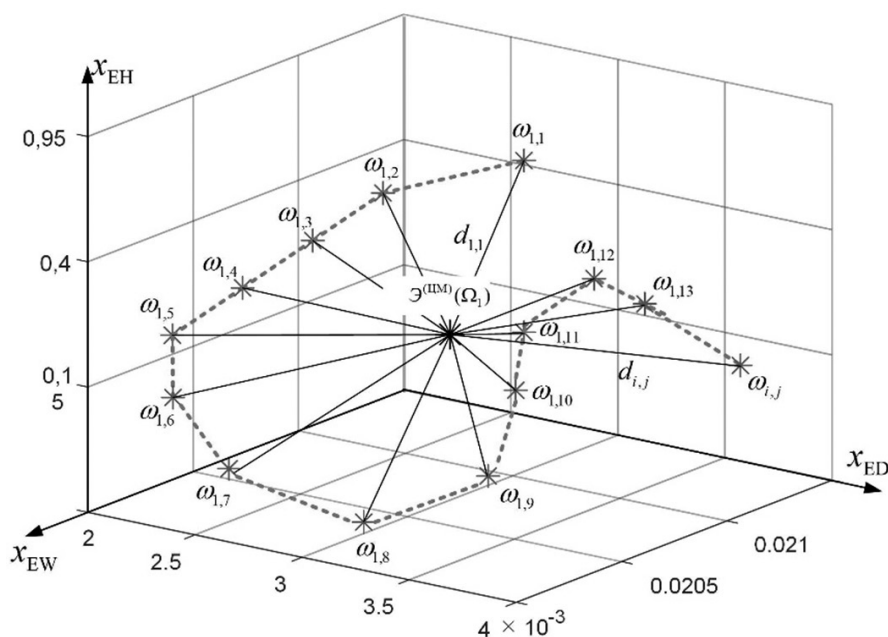


Рис. 7. Результаты оценивания параметров сигналообразования СМНФ



Рис. 8. Схема проведения эксперимента по приему и обработке СМНФ

$$\omega_{n,m} : d = \min \{d(\omega_{n,m})\}.$$

### Результаты экспериментальных исследований

Оценивание работоспособности методики осуществлялось путем проведения эксперимента по регистрации и обработке сигналов космического аппарата (КА) «Евтелсат-33Е (33 град. в.д.) системы связи и вещания фирмы «Евтелсат», функционирующего по технологии много-станционного доступа с временным разделением (МДВР) (рис. 8).

В целях обработки зарегистрированного сигнала разработано специальное программное обеспечение (СПО), состоящее из программных модулей «Формирования ФД СМНФ в условиях влияния шумов» и «Реализации метода РВМ СМНФ на основе кластеризации параметров ФД», обеспечивающих выполнение следующих функций:

- оценивание первичных радиотехнических параметров сигнала (несущая частота, отношение сигнал/шум, тактовая частота, длительность частотной посылки (ЧП) группового сигнала (ГС) с МДВР и др.);
- селекция пакетов по различным параметрам (коммутационно-адресная часть, преамбула и т.д.);
- группировка пакетов по однородным признакам и параметрам;
- построение ФД каждой ЧП ГС с МДВР и оценивание их параметров;
- интерпретацию радиосигнала в пространстве параметров ФД;
- распознавание вида модуляции СМНФ;
- оценивание параметров модуляции СМНФ.

В результате применения предложенного в работе метода и разработанной методики удалось оценить следующие параметры сигналообразования, а именно: вид модуляции — двухпозиционный частотно-модулированный сигнал

с индексом модуляции равным 0,7 и коэффициентом скругления ФНЧ типа «приподнятый косинус» равным 0,3.

### Заключение

Применение разработанной методики распознавания вида модуляции радиосигналов с непрерывным изменением фазы позволяет: решать задачи планового радиоконтроля за соблюдением дисциплины и регламента радиосвязи; выявить нелегальные радиопередатчики и оценить характеристики излучений РЭС СМНФ для определения их местоположения; измерить зоны энергетического покрытия при оценке качества радиосвязи; определить интенсивность использования частотного ресурса.

Реализация данной методики на практике не требует изменения аппаратной части существующих комплексов радиомониторинга объектов радиоконтроля и может быть выполнена путем обновления программного обеспечения.

Работоспособность разработанной методики и правильность заложенных в нее решений получили практическое подтверждение путем обработки цифровых записей радиосигналов КА «Евтелсат-33Е» системы связи и вещания фирмы «Евтелсат».

### Литература

1. Мухин И.Е., Хмелевская А.В., Бабанин И.Г. Методологические основы синтеза систем обеспечения электромагнитного доступа средствами радиомониторинга современных систем телекоммуникации. — Курск: Юго-Зап. гос. ун-т. 2016. 316 с.
2. 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 Го-



сударственной 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/)

3. Деев В.В. Методы модуляции и кодирования в современных системах связи. — СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского. 2003. 137 с.

4. Рекомендация МСЭ-R SM.1541-6. Нежелательные излучения в области внеполосных излучений. URL: [http://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1541-6-201508-I!!PDF-R.pdf](http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1541-6-201508-I!!PDF-R.pdf) (дата обращения: 17.08.2021).

5. Пузырев П.И. Исследование влияния помехи по соседнему каналу на вероятность ошибки приема частотно-манипулированного сигнала // Омский научный вестник. 2012. № 3. С. 344–348.

6. Медведев В.М. Основы обработки сигналов: учебное пособие. — СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского. 2007. 126 с.

7. Еремеев И.Ю. Теоретические основы структурного анализа радиосигналов со сложной частотно-временной структурой. — СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского. 2015. 225 с.

8. Замарин А.И. Обнаружение и анализ сигналов сложной структуры. — СПб: МО РФ. 1996. 552 с.

9. 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>

## References

1. Muhin I.E., Hmelevskaya A.V., Babanin I.G. Methodological foundations for the synthesis of systems for providing electromagnetic

access by means of radiomonitoring of modern telecommunication systems. — Kursk: SWSU. 2016. 316 p.

2. On the development concept of radiation monitoring of commercial radio electronic devices and (or high frequency units in Russian Federation over the period to 2025: approved by the State Frequency Commission under the Ministry of Communication of Russian Federation on 04 July 2017, № 17-42-06). Available at: [www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71629318/](http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71629318/)

3. Deev V.V. Methods for the modulation and coding in the modern communication systems. — Saint-Petersburg: Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. 2003. 137 p.

4. Recommendation SM.1541-6. Unwanted emissions in the out-of-band domain. Available at [http://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1541-6-201508-I!!PDF-R.pdf](http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1541-6-201508-I!!PDF-R.pdf) (17.08.21).

5. Puzyrev P.I. Investigation of the influence of interference on an adjacent channel on the probability of error in receiving a frequency-shift keyed signal // Omsk Scientific Bulletin. 2012. Vol. 3. P. 344–348.

6. Medvedev V.M. Signal processing basics. Saint-Petersburg, Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. 2007. 126 p.

7. Eremeev I.Y. Theoretical foundations of the structural analysis of radio signals with a complex time-frequency structure. — Saint-Petersburg: Military Space academy named after A.F. Mozhaisky. 2015. 225 p.

8. Zamarin A.I. The detection and analyze of signals with a complex structure. — Saint-Petersburg: Ministry of Defense. 1996. 552 p.

9. Kadukov E.P. The model of radio signals with continuous phase modulation base on the parameters of phase diagrams and modulation classification using the informative feature complex in the foreign satellite communication systems. Zhurnal Radio elektroniki [Journal of Radio Electronics]. 2019. № 7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.7.12>