

# МОДЕЛЬ РАДИОСИГНАЛОВ С МОДУЛЯЦИЕЙ С НЕПРЕРЫВНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ В ПРОСТРАНСТВЕ ПАРАМЕТРОВ ФАЗОВЫХ ДИАГРАММ И КОМПЛЕКС ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ВИДОВ МОДУЛЯЦИИ ИЗЛУЧЕНИЙ ЗАРУБЕЖНЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ

Е. П. Кадуков

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

Статья поступила в редакцию 18 июня 2019 г.

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы построения модели радиосигналов с модуляцией с непрерывным изменением фазы зарубежных спутниковых систем связи в пространстве параметров фазовых диаграмм. Рассмотрены условия, при которых достигается требуемая точность оценок параметров фазовых диаграмм, и как итог – обеспечивается достоверность распознавания классов сигналов.

**Ключевые слова:** радиосигналы с модуляцией с непрерывным изменением фазы, фазовые диаграммы.

**Abstract.** The article considers questions of the construction a model of radio signals with continuous phase modulation in foreign satellite communication systems based on the classification of the phase diagrams parameters. The conditions under which the required accuracy of estimates of the parameters of phase diagrams is achieved are considered, and as a result, the reliability of recognition of signal classes is ensured.

**Keywords:** continuous phase modulation radio signals, phase diagrams.

## Введение

Тенденция развития технологии передачи информации в зарубежных современных спутниковых системах связи (ССС) направлены на повышение помехоустойчивости и эффективности передачи информации. С этой целью применяются новые виды модуляции, обеспечивающие повышение пропускной способности каналов связи, снижение влияния помех в каналах и повышение

эффективности использования радиочастотного ресурса [1]. К числу таких видов модуляции относятся сигналы с модуляцией с непрерывной фазой (СМНФ) (СРМ – Continuous Phase Modulation), формируемые на основе различного рода сглаживающих фильтров.

Многообразие видов модуляции сигналов зарубежных ССС с течением времени неуклонно возрастает, что обуславливает относительно высокую степень параметрической неопределенности анализируемых радиосигналов. 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. Данное обстоятельство ограничивает информационный доступ к каналам связи и приводит к потере информации. Таким образом, имеет место противоречие между большим многообразием видов и параметров модуляции, с одной стороны, и возможностями по их обработке, с другой.

Используемые в современных систем радиомониторинга методы распознавания видов манипуляции радиосигналов, достаточно хорошо проработаны применительно к сигналам с традиционными видами модуляции, не позволяют устранить неопределенность вида и параметров манипуляции для широкого класса СМНФ. Для автоматического распознавания и оценивания параметров СМНФ с требуемым качеством на первоначальном этапе целесообразно построить модель радиосигналов с непрерывным изменением фазы зарубежных ССС в пространстве параметров фазовых диаграмм (ФД).

Цель статьи состоит в выявлении и исследовании поведения признаков радиосигналов с непрерывным изменением фазы в фазовое пространство для распознавания классов сигналов с требуемой достоверностью.

## **1. Принципы применения глазковых диаграмм для оценивания параметров радиосигналов с непрерывным изменением фазы зарубежных ССС**

Для создания теоретической базы исследования СМНФ воспользуемся обобщенной математической моделью радиосигнала [2]:

$$u(t) = U_0 \cdot \cos[\omega_0 \cdot t + \varphi_M(t, a_i) + \varphi_0], t \in [0, T_{\text{НАБЛ}}], \quad (1)$$

где  $\varphi_M(t, a_i)$  – модуляционная составляющая фазы сигнала;

$\varphi_0$  – начальная фаза сигнала;

$U_0$  – амплитуда сигнала;

$\omega_0$  – несущая круговая частота, где  $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_0$ ;

$f_0$  – несущая частота сигнала;

$a_i$  – последовательность информационных символов, выбранных

$$\text{из алфавита } a_i \in \{\pm 1, \pm 3, \dots, \pm(M-1)\}, i = \left\lfloor \frac{T_{\text{НАБЛ}}}{\tau_{\text{Э}}} \right\rfloor;$$

$T_{\text{НАБЛ}}$  – интервал наблюдения;

$\tau_{\text{Э}}$  – длительность элементарного импульса.

Непрерывность фазы заключается в гладкости фазовых траекторий, которые в тактовые моменты времени принимают значения, кратные  $\pi h$ ,

$$\varphi_M(t, a_i) = 2 \cdot \pi \cdot h \sum_{i=k-L+1}^k a_i \cdot q(t - i \cdot T), \text{ при } k \cdot T \leq t \leq (k+1) \cdot T, \quad (2)$$

где  $q(t)$  – фазовая характеристика, отражающая форму изменения фазы сигнала при действии единичного информационного символа из

множества  $\{a_i\}$  на интервале  $0 < t < L \cdot T$ , где  $q(t) = \int_0^t g(\tau) d\tau$ ;

$g(t)$  – частотная характеристика элементарного символа, длительность которого равна  $L \cdot T$ ;

$k$  – целое число,  $k = \left\lfloor \frac{T_{\text{НАБЛ}}}{T_{\text{ТИ}}} \right\rfloor, k \gg 1$ ;

$L$  – число периодов передачи информационных символов, длительностью  $T$ , на которые влияет отдельный информационный символ из множества  $\{a_i\}$ ;

$h$  – индекс модуляции.

Таким образом, полную фазу можно определить следующим образом:

$$\varphi(t, a_i) = 2 \cdot \pi \cdot h \sum_{i=k-L+1}^k a_i \cdot q(t - i \cdot T) + \varphi_0. \quad (3)$$

Для графического отображения изменения комплексной огибающей, фазы и частоты сигнала используются глазковые диаграммы (ГД), формируемые наложением собственных реализаций сигнала, сдвинутых относительно друг друга на интервал корреляции [3]. Реализации совмещаются по координате времени, образуя согласованно накопленный графический образ для сравнения элементов сигнала. Глазковые диаграммы отражают статистику взаимного распределения уровня – межсимвольную корреляцию формы импульсов и интервала изохронности. Диаграмма может быть статической при не обновляемом графике или динамической, если состав реализаций обновляется.

При проведении измерений получили распространение три основных класса диаграмм, представленных на рис. 1, а именно [4]:

- диаграммы комплексной огибающей сигнала в виде диаграмм вещественной и мнимой составляющей ( $\xi_{\text{quad}} = f_{\text{оц}}(Re_{u(t)}, Im_{u(t)})$ );
- фазовые диаграммы ( $\xi_{\text{ph}} = f_{\text{оц}}(\phi(t, a))$ );
- частотные диаграммы ( $\xi_{\text{fr}} = f_{\text{оц}}(f_c(t))$ ).

Динамические ГД получаются на осциллографе в режиме ждущей развертки, синхронизируемой опорной тактовой частотой.

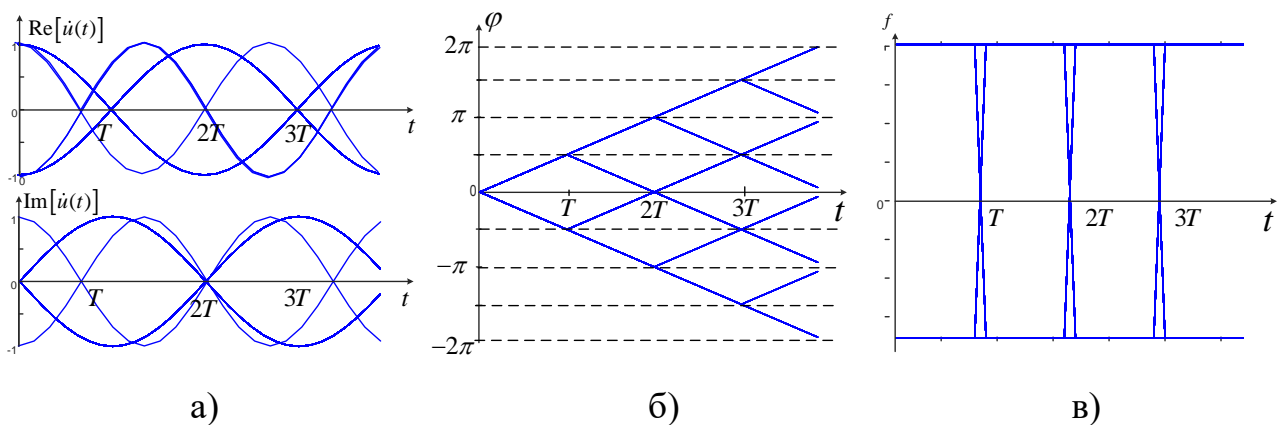


Рис. 1. Пример формирования ГД двухпозиционного МНФ-сигнала:  
 а – комплексной огибающей; б – фазы; в – частоты.

Глазковая диаграмма позволяет обнаруживать и оценивать в сигнале [5]:

- свойства изохронности и дискретности (наличие глазка);
- форму импульсов (форма глазка);
- межсимвольную интерференцию;
- стабильность тактовой частоты относительно частоты опорного генератора.

Для дальнейшего анализа необходимо осуществить выбор класса глазковых диаграмм. С этой целью воспользуемся векторным представлением радиосигнала, представленного на рис. 2.

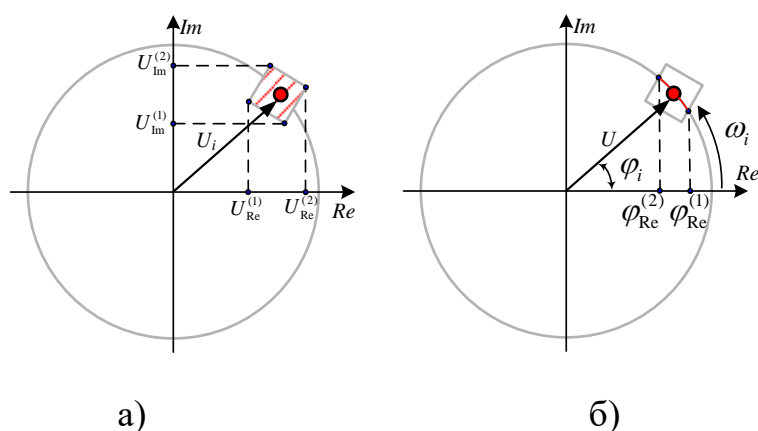


Рис. 2. Векторное представление изменения характеристик радиосигнала:  
а – комплексной огибающей; б – фазы.

На основе рис. 2 основным недостатком использования ГД, построенных по квадратурным компонентам комплексной огибающей сигнала, является чувствительность к началу нарезки  $\varphi_0$ , а также повышенная шумовая составляющая, вследствие влияния шумов на обе квадратуры. По сравнению с диаграммами комплексной огибающей сигнала фазовые диаграммы имеют преимущество по степени влияния шумов. Так шумовая составляющая в два раза ниже, поскольку не учитывается изменение амплитуды. Исходя из проведенного анализа для построения модели излучений зарубежных ССС воспользуемся ФД СМНФ.

В работе [6] предложено множество разнообразных параметров, которые могут быть использованы для описания фазовых траекторий в фазовом пространстве представления радиосигнала

$$f_{\text{оц}}(\xi_{\text{ph}}) = \{x_{\text{EL}}, x_{\text{EA}}, x_{\text{EH}}, x_{\text{VO}}, x_{\text{QF}}, x_{\text{CL}}, x_{\text{CR}}, x_{\text{ED}}, x_{\text{EW}}, x_{\text{HO}}, x_{\text{RT}}, x_{\text{FT}}\}, \quad (4)$$

где  $f_{\text{оц}}(\xi_{\text{ph}})$  – функция оценки параметров ФД;

$x_{\text{EL}}$  – глазковый уровень (Eye Levels);

$x_{\text{EA}}$  – глазковая амплитуда (Eye Amplitude);

$x_{\text{EH}}$  – амплитуда чистого глаза (Eye Height);

$x_{\text{VO}}$  – процентное соотношение глазкового пересечения (Vertical Opening);

$x_{\text{QF}}$  – добротность (Quality Factor);

$x_{\text{CL}}$  – амплитуда глазкового пересечения (Crossing Levels);

$x_{\text{CT}}$  – период глазкового пересечения (Crossing Times);

$x_{\text{ED}}$  – глазковая задержка (Eye Delay);

$x_{\text{EW}}$  – ширина чистого глаза (Eye Width);

$x_{\text{HO}}$  – горизонтальное открытие глаза (Horizontal Opening);

$x_{\text{RT}}$  – время глазкового нарастания (Rise Time);

$x_{\text{FT}}$  – время глазкового затухания (Fall Time).

В общем случае, использование малоинформативных параметров при решении задач распознавания приводит к снижению надежности классификации [7]. Это связано с тем, что излишняя размерность пространства признаков значительно усложняет процесс расчета границ принятия решения о классе анализируемого объекта, а также требует применения более сложных моделей законов распределения многомерных случайных величин.

На основе рекомендаций Консультативного комитета по космическим системам передачи информации (CCSDS – Consultative Committee for Space Data System) сформирован алфавит классов, соответствующий СМНФ,

$$\Omega_{\text{МНФ}} = \{\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4\}, \quad (5)$$

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

$\Omega_2$  – частотно-манипулированные сигналы с непрерывным изменением

фазы (ЧМ<sub>н</sub>НФ);

$\Omega_3$  – частотно-манипулированные сигналы с использованием ФНЧ типа «квадратный корень из приподнятого косинуса»;

$\Omega_4$  – частотно-манипулированные сигналы с использованием ФНЧ Гаусса.

Отметим, что в априорном алфавите классов  $\Omega_{\text{МНФ}}$  каждый класс представляет собой множество модификаций конкретного вида манипуляции, образованных различными формами элементарного импульса. При решении задачи распознавания к одному и тому же классу необходимо относить элементарные импульсы, образованные ФНЧ типа «квадратный корень из приподнятого косинуса» или Гаусса при различных значениях коэффициента скругления.

Для получения представительных выборок реализаций вектора значений параметров ФД  $X_{\Omega_{\text{МНФ}}}$  в процессе моделирования определялись значения признаков априорного словаря при различных формах частотных импульсов, образующих радиосигналы СПИ соответствующих классов. То есть, для каждого класса  $\Omega_{\text{МНФ}}$  статистика набиралась для нескольких модификаций соответствующего обобщенного вида модуляции, представленных в таблице 1.

Таблица 1. Множество модификаций СМНФ, формирующих множество альтернатив распознавания.

№ п/п	Класс	Форма элементарного импульса	Параметр	Значение параметра
1	$\Omega_1$	Импульс, образованный ФНЧ Гаусса	$BT$	0,2, 0,25, 0,3, 0,5
2	$\Omega_2$	Прямоугольный импульс	$h$	0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9
3	$\Omega_3$	Импульс, образованный ФНЧ типа «корень квадратный из приподнятого косинуса»	$h$	0,25, 2/3
			$\alpha_{\text{RRC}}$	0,3, 0,5
4	$\Omega_4$	Импульс, образованный ФНЧ Гаусса	$h$	0.36, 0.5
			$BT$	0.25, 0.5

## 2. Информативный признак для распознавания видов модуляции СМНФ на основе классификации параметров фазовых диаграмм

Проведенный анализ информативности параметров ФД, в рамках решаемой задачи, выявил следующие признаки, позволяющие провести классификацию параметров ФД разных видов модуляции с требуемой достоверностью, а именно:

$$f_{\text{оц}}^{\text{inf}}(\xi_{\text{ph}}) = \{x_{\text{EW}}, x_{\text{ED}}, x_{\text{EH}}\}, \quad (6)$$

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

$x_{\text{EH}}$  – амплитуда «чистого глаза»;

$x_{\text{ED}}$  – глазковая задержка.

Физический смысл этих параметров ФД поясняется на рис. 3.

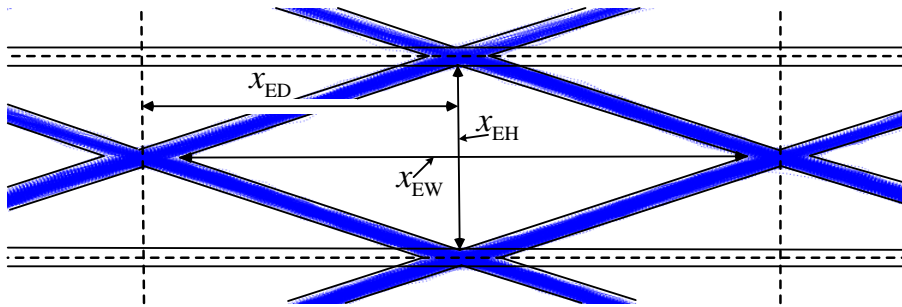


Рис. 3. Параметры  $x_{\text{EW}}, x_{\text{ED}}, x_{\text{EH}}$  ФД по модулю  $2 \cdot \pi$ .

Графическое отображение полученных значений параметров  $x_{\text{EW}}, x_{\text{ED}}, x_{\text{EH}}$  в двумерном пространстве признаков для  $\Omega_{\text{МНФ}}$  представлено на рис. 4.

Основным показателем качества работы системы распознавания, который широко используется в статистической теории распознавания образов, является вероятность распознавания, которая в нашем случае будет зависеть от совпадения параметров ФД. Анализируя рис. 5 сделаем вывод, о том, что при одновременном рассмотрении трех параметров  $x_{\text{EW}}, x_{\text{ED}}, x_{\text{EH}}$  ФД, существует возможность их разделения по принадлежности к областям локализации значений признаков различных классов в многомерном пространстве параметров.



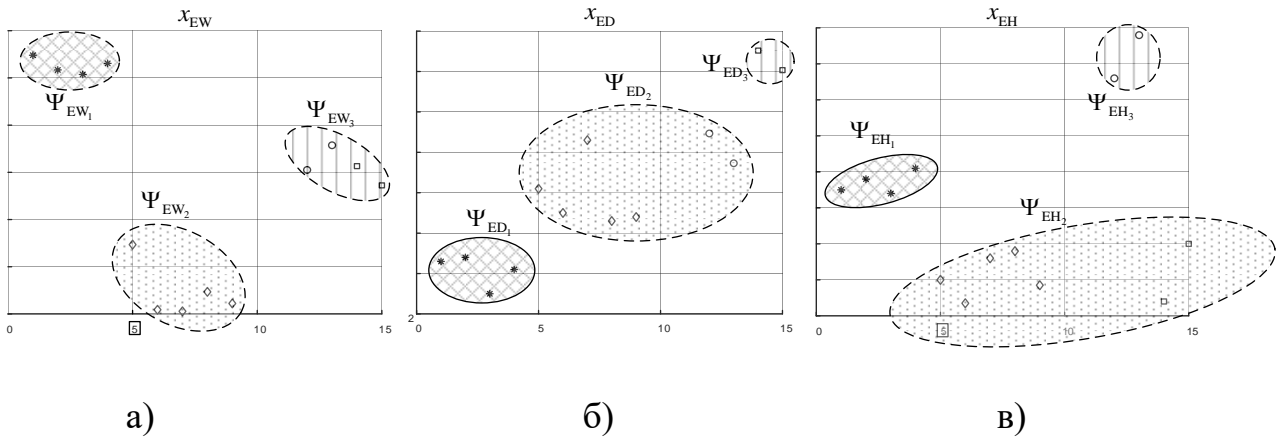


Рис. 4. Представление параметров ФД, соответствующих определенным классам (видам модуляции)  $\Psi_{p_{\{i\}}}$  априорного словаря:

а – ширина чистого глаза; б – глазковая задержка; в – амплитуда чистого глаза.

Путем математического моделирования проведена серия статистических испытаний, которая позволила получить выражения для законов распределения признаков и основных числовых характеристик распределения параметров  $x_{EW}, x_{ED}, x_{EH}$  ФД.

Так как задача классификации решается на основе анализа принятого на фоне шумов сигнала, несущего неизвестное информационное сообщение, то все перечисленные в априорном словаре признаки являются стохастическими, а их значения – случайными величинами (СВ).

Для оценивания законов распределений параметров СВ  $\tilde{x}_{EW}, \tilde{x}_{ED}, \tilde{x}_{EH}$  выдвинута первоначальная гипотеза о возможности их аппроксимации нормальным законом распределения. Графическое представление соответствия выдвинутого вида закона распределения СВ применим вероятностный график [8]. В случае, если данные СВ распределены согласно выдвинутой первоначальной гипотезе, то точки выстраиваются на базовой линии, представленной на рис.5 пунктирной линией.

Для определения закона распределения использован метод Смирнова для проверки гипотез о законе распределения. На рис. 6 представлены гистограммы и статистические функции распределения параметров ФД, а также их аппроксимация теоретическим законом распределения.

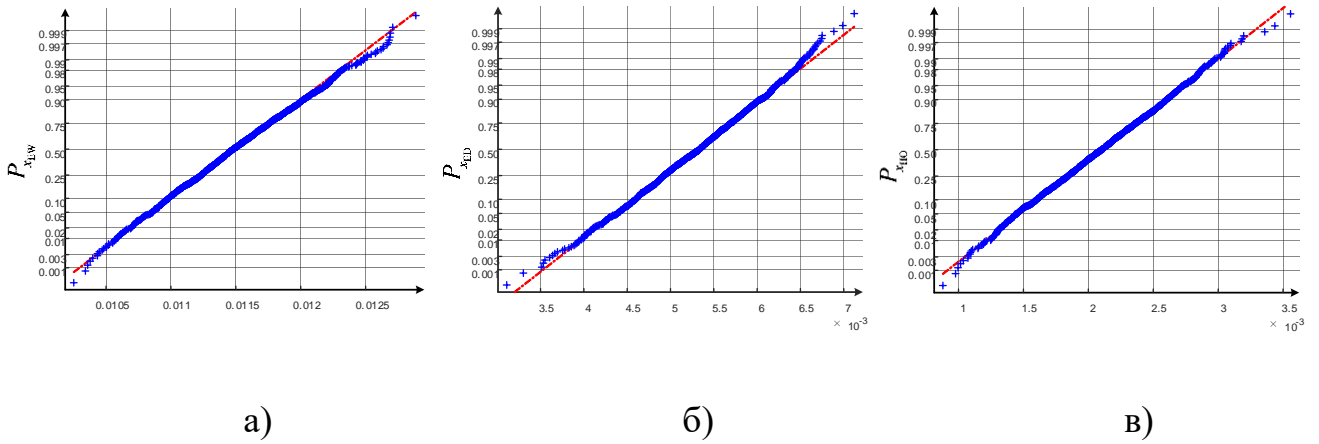


Рис. 5. Оценки соответствия параметров  $\tilde{x}_{EW}, \tilde{x}_{ED}, \tilde{x}_{EH}$  нормальному закону на основе нормального вероятностного графика: а – ширина «чистого глаза»; б – глазковая задержка; в – амплитуда «чистого глаза».

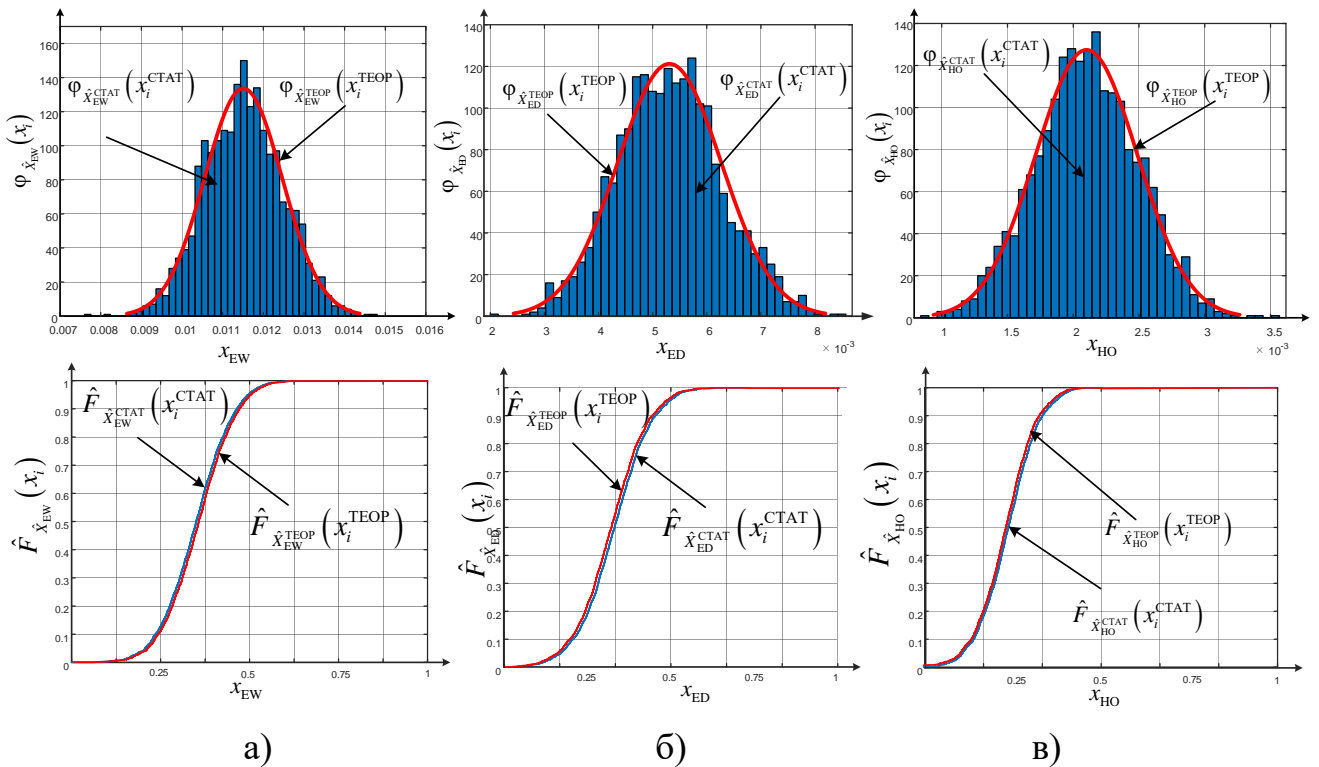


Рис. 6. Плотности вероятности и функции распределения параметров  $\tilde{x}_{EW}, \tilde{x}_{ED}, \tilde{x}_{EH}$  ФД: а – ширина «чистого глаза»; б – «глазковая» задержка; в – амплитуда «чистого глаза».

В результате имитационного моделирования и проверки гипотез о законах распределения оцениваемых параметров установлено, что параметры  $\tilde{x}_{EW}, \tilde{x}_{ED}, \tilde{x}_{EH}$  представляют собой случайные величины, распределенные по нормальному закону распределения. В этом случае, для описания статистических характеристик оценок параметров ФД достаточно

математического ожидания  $M(x)$  и среднеквадратичного отклонения  $\sigma(x)$ .

Обоснование необходимой длины выборки производилось оцениванием флуктуации параметров  $x_{EW}, x_{ED}, x_{EH}$  в зависимости от длины анализируемой последовательности модуляционных символов (рис. 7).

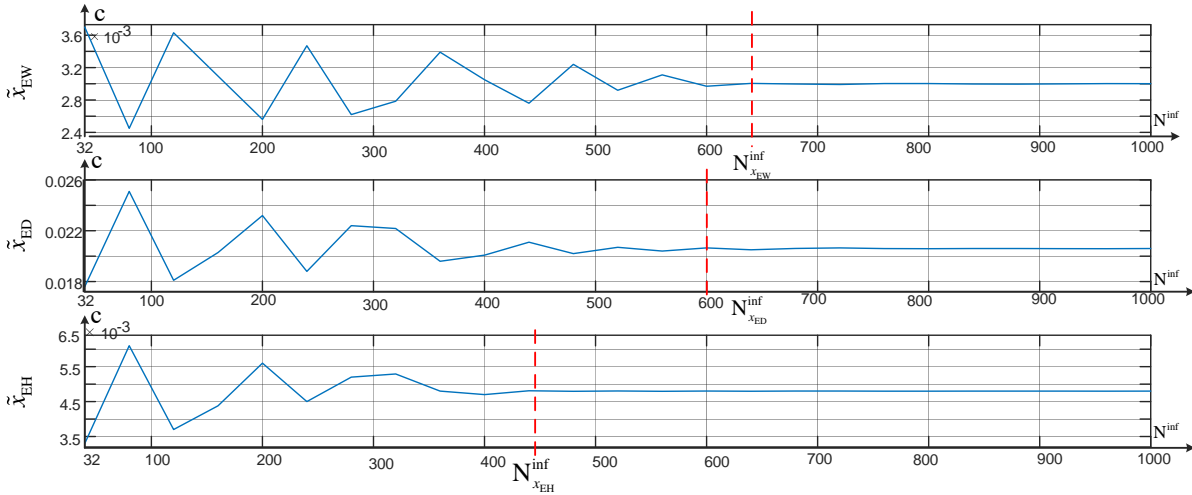


Рис. 7. Оценивание флуктуации параметров  $\tilde{x}_{EW}, \tilde{x}_{ED}, \tilde{x}_{EH}$  ФД.

В ходе проведения численных экспериментов для каждой из описанных модификаций видов манипуляций подтверждено, что требуемая точность оценок параметров  $\tilde{x}_{EW}, \tilde{x}_{ED}, \tilde{x}_{HO}$  достигается при длине последовательности модуляционных символов, превышающей 640 символов в условиях  $N^{inf} = \max(N_{x_{EW}}^{inf}, N_{x_{ED}}^{inf}, N_{x_{EH}}^{inf})$ .

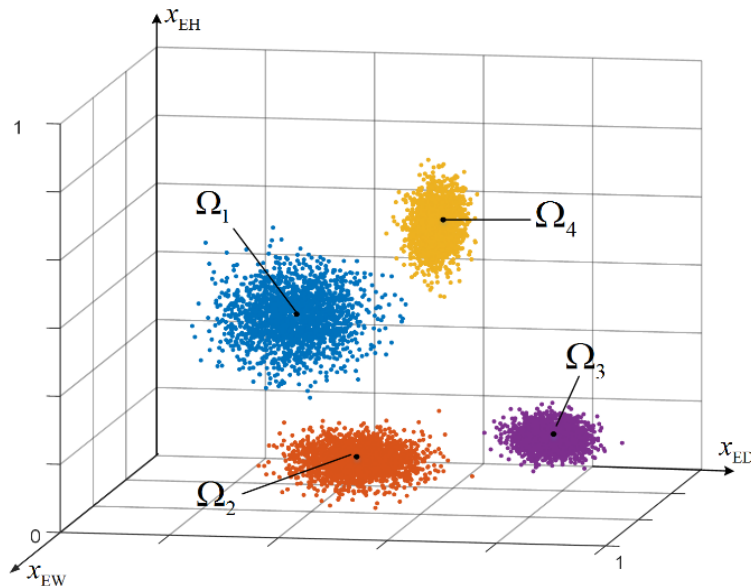


Рис. 8. Результаты оценивания в трехмерном пространстве параметров ФД.

На рис. 8 представлены результаты моделирования при условии, что длина информационной последовательности составляет 900 символов и отношение сигнал/шум равно 12 дБ.

Известно, что из-за неидеальности радиопередающего и радиоприемного трактов, а также влияния помех в канале связи измерение (оценивание) параметров ФД МНФ-сигналов всегда осуществляется не точно, а именно:

$$\tilde{X}_{\text{ФД}} = X_{\text{ФД}} + \hat{\delta}_{X_{\text{ФД}}}, \quad (7)$$

где  $\tilde{X}_{\text{ФД}}$  – оценка параметра ФД,  $\tilde{X}_{\text{ГД}} \in \{\tilde{x}_{\text{EW}}, \tilde{x}_{\text{ED}}, \tilde{x}_{\text{EH}}\}$ ;

$\hat{\delta}_{X_{\text{ФД}}}$  – значение ошибки измерения параметров ФД;

$X_{\text{ФД}}$  – истинное значение параметров ФД.

Значения оценок параметров ГД зависят от отношения сигнал/шум  $q_{\text{осш}} = E/N$ , где  $E$  – средняя мощность сигнала,  $N$  – средняя мощность шума. Чем это отношение больше, тем меньше разброс оценок значений относительно истинного ( $\lim_{E/N \rightarrow \infty} \delta = 0$ ).

На рис. 9 приведены графики зависимостей среднеквадратичного отклонения ошибки оценивания параметров ФД  $\tilde{x}_{\text{EW}}, \tilde{x}_{\text{ED}}, \tilde{x}_{\text{EH}}$  от отношения сигнал/шум.

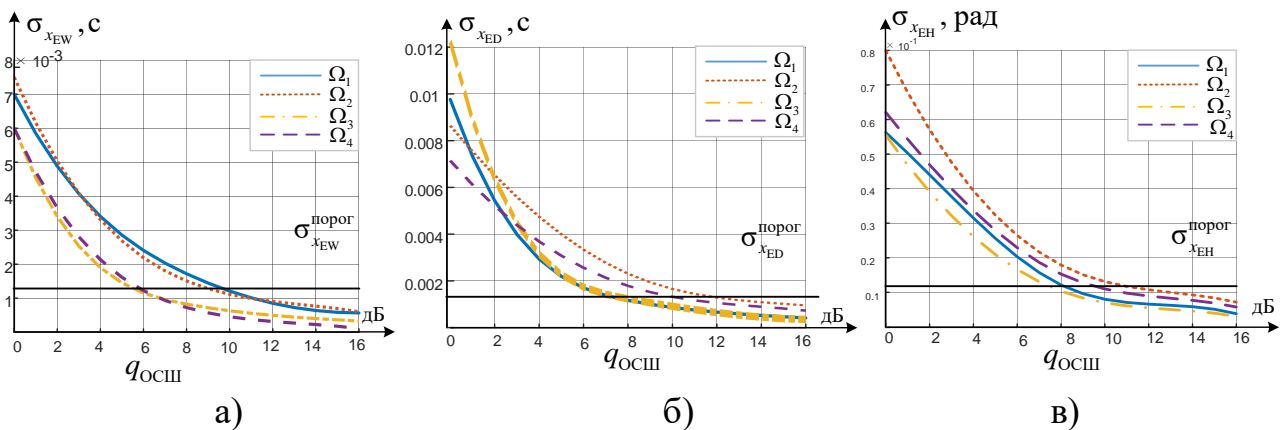


Рис. 9. График зависимости СКО от отношения сигнал/шум при оценивании параметров ФД: а – ширина «чистого глаза»; б – «глазковая» задержка; в – амплитуда «чистого глаза».

Полученные результаты свидетельствуют о том, что предложенный перечень параметров ФД может быть использован для обеспечения распознавания вида модуляции в классе СМНФ с высокой достоверностью.

### Заключение

Представленная модель позволяет исследовать возможности по распознаванию видов модуляции радиосигналов с непрерывным изменением фазы, применяемых в современных системах передачи информации. На основе разработанной описательной модели исследованы основные свойства СМНФ, а именно:

- требуемая точность оценок параметров  $\tilde{x}_{EW}, \tilde{x}_{ED}, \tilde{x}_{EH}$  достигается при длине последовательности модуляционных символов, превышающей 640 символов;

- статистические распределения параметров ФД можно адекватно аппроксимировать нормальным законом распределения;

- параметры  $x_{EW}, x_{ED}, x_{EH}$  фазовых диаграмм, которые обеспечивают наилучшие результаты кластеризации классов множества  $\Omega_{МНФ}$ .

### Литература

1. Деев В.В. Методы модуляции и кодирования в современных системах связи. – СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2003. – 137 с.
2. Обнаружение и анализ сигналов сложной структуры / под ред. А.И. Замарина. – СПб.: МО РФ, 1996. – 552 с.
3. Гизунов С.А., Гречкин А.О., Коновальчик П.М. Анализ сигналов электросвязи. – М.: Янус-К, 2005. – 346 с.
4. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. / пер. с англ. – М.: Вильямс, 2003. – 1104 с.
5. Смирнов А.В. Оценка параметров глазковой диаграммы по переходной и амплитудно-частотной характеристикам с использованием нейронной сети //

Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2018. – № 3. – С. 73-87.

6. Ткалич О.П., Дятлов А.А., Мамаев Р.А. Применение глазковых диаграмм для исследования цифровых сигналов. // Электроника для систем управления. – 2009. – № 20. – С. 32–41.

7. Кириллов С.Н., Покровский П.С. Алгоритм классификации вида модуляции неизвестного радиосигнала космических систем передачи информации // Вестник РГРТУ. – 2013. – № 44. – С. 3–11.

8. Статистические методы обработки результатов измерений / Р.М. Юсупов, Г.Б. Петухов, В.Н. Сидоров и др.; под ред. Р.М. Юсупова. – Министерство обороны РФ, 1984. – 563 с.

**Для цитирования:**

Е. П. Кадуков. Модель радиосигналов с модуляцией с непрерывным изменением в пространстве параметров фазовых диаграмм и комплекс информативных признаков для распознавания видов модуляции излучений зарубежных спутниковых систем связи. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 7. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul19/12/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2019.7.12