

На правах рукописи



Кисельников Андрей Евгеньевич

**АЛГОРИТМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТИПОВ ИСКАЖЕНИЯ  
СИГНАЛОВ С ЦИФРОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ НА ОСНОВЕ  
АНАЛИЗА ВЕКТОРА ОШИБОК**

Специальность 05.12.13  
Системы, сети и устройства телекоммуникаций

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Владимир – 2020

Работа выполнена на кафедре инфокоммуникаций и радиофизики  
Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова

Научный руководитель

**Приоров Андрей Леонидович**

доктор технических наук, профессор кафедры  
инфокоммуникаций и радиофизики  
ФГБОУ ВО «Ярославский государственный  
университет им. П.Г. Демидова», г. Ярославль

Официальные оппоненты:

**Мухин Иван Ефимович**

доктор технических наук, главный конструктор  
специальных проектов АО «Авиаавтоматика имени  
В.В. Тарасова», г. Курск

**Зеленов Дмитрий Юрьевич**

кандидат технических наук, начальник сектора  
ОАО «Владимирское конструкторское бюро  
радиосвязи», г. Владимир

Ведущая организация

ПАО «Ярославский радиозавод», г. Ярославль

Защита диссертации состоится 08 апреля 2020 г. в 16:00 на заседании  
диссертационного совета Д 212.025.04 при Владимирском государственном  
университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых  
по адресу: 600000, г. Владимир, пр-т Строителей, д. 3/7, ВлГУ, корп. 3, ауд. 301-3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Владимирского  
государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая  
Григорьевича Столетовых и на сайте <http://diss.vlsu.ru>

Автореферат разослан 30 января 2020 г.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просим направлять по адресу:  
600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, РТ и РС.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



А.Г. Самойлов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

В настоящее время значительное количество современных сетей, систем и устройств телекоммуникаций, включая профессиональные и специальные, базовые станции систем радиодоступа, любительское радио выполняются с использованием технологии программно-определяемого радио (ПОР).

Данная технология открывает широкие возможности для внесения изменений, улучшения параметров и внедрения дополнительных функций. К ним относятся алгоритмы оценки качества передачи информации и алгоритмы идентификации искажений, которые могут встраиваться в разработанное оборудование и даже оборудование, которое уже находится в эксплуатации.

Несмотря на усложнение систем передачи информации и применение все более сложных видов модуляции классические квадратурные виды цифровой модуляции, такие как BPSK, QPSK, QAM-4, QAM-16, не теряют своей актуальности и устойчиво сохраняют определенный спектр применения. В частности, это имеет место, когда нет необходимости в высокоскоростной передаче информации, а требуется обеспечить максимально устойчивую ее передачу с приемлемой скоростью и минимумом излучаемой мощности, например, в восходящей линии системы радиодоступа.

В таких условиях метрики оценки качества излучаемого в эфир и принимаемого радиосигналов начинают играть все более важную роль. Именно от их качественной и стабильной работы будет зависеть выбор типа модуляции, частоты несущей, количества ортогональных несущих или любого другого параметра в высокоинтеллектуальной телекоммуникационной системе (ТС).

Кроме метрик оценки качества радиосигнала широкое распространение получили алгоритмы слепой компенсации его искажения. Данные алгоритмы основаны на статистическом анализе принимаемого радиосигнала.

Основным недостатком классических метрик оценки качества радиосигнала является то, что они дают информацию только о степени его искажения, а не о его причинах, что затрудняет устранение влияния данного искажения на телекоммуникационную систему. В свою очередь алгоритмы слепой компенсации предназначены для компенсации строго определённого типа искажения радиосигнала и не эффективны в других случаях.

**Степень разработанности темы исследования.** Основной вклад в исследование данной тематики внесли коллективы организаций, разрабатывающих стандарты для телекоммуникационных систем, таких как МСЭ (ITU), ЕИТС (ETSI). Среди публикаций зарубежных ученых можно выделить работы М.Д. МакКинли, А. Георгадиса, Т.Л. Дженсена, О. Мендозы, А.К. Ванга, С. Фрейслебена, Б. Хемпа, П. Строта. В них приведены методики вычисления вектора ошибок для основных видов модуляции и стандартов телекоммуникационных систем.

Среди отечественных ученых необходимо отметить работы М.А. Дубова, Д.Д. Стоянова, Ю.В. Полянина, А.Л. Приорова, внесших большой вклад в разработку алгоритмов неэталонного вычисления метрик оценки качества цифровых радиосигналов.

**Целью работы** является обнаружение и идентификация типов искажений радиосигналов на фоне шумов для повышения помехоустойчивости телекоммуникационных систем.

В соответствии с указанной целью в работе поставлены и решены следующие **задачи**:

1 Анализ существующих метрик и алгоритмов оценки качества радиосигнала и выявление возможных путей реализации алгоритмов идентификации искажений.

2 Разработка алгоритмов идентификации различных типов искажений для радиосигналов с квадратурной модуляцией.

3 Исследование характеристик разработанных алгоритмов при помощи статистического моделирования.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач использованы методы цифровой обработки сигналов, теории вероятностей и математической статистики, широко использовались также методы компьютерного моделирования.

**Объектом исследования** являются методы обнаружения и идентификации линейных и нелинейных искажений радиосигнала, в том числе и на фоне аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ).

**Предметом исследований** являются алгоритмы обнаружения и идентификации искажения радиосигнала на основе анализа поведения вектора ошибок и статистических параметров, характеризующих работу телекоммуникационной системы.

#### **Научная новизна**

1 Разработан алгоритм детектирования и компенсации искажения сигнального созвездия BPSK на основе анализа вектора ошибок и статистических характеристик ТС, основной особенностью которого является способность компенсировать искажение созвездия сигнала BPSK в отличие от широко распространенных алгоритмов слепой компенсации.

2 Разработана методика идентификации типа искажения радиосигнала с модуляцией QPSK – QAM-4, позволяющая идентифицировать и различить такие искажения как амплитудный и фазовый разбалансы квадратур.

3 Разработана методика идентификации искажений радиосигнала QAM-16, основанная на анализе поведения вектора ошибок при передаче различных канальных символов.

#### **Практическая значимость**

1 Предложенные алгоритмы и методики обладают высокой степенью интегрируемости с современным измерительным оборудованием и телекоммуникационными устройствами, построенными по архитектуре программно-определяемого радио, в результате чего их внедрение не требует существенных затрат.

2 Алгоритм обнаружения и идентификации искажения созвездия с BPSK модуляцией обеспечивает повышение помехоустойчивости телекоммуникационной системы до 1,3 дБ.

3 Методика идентификации типа искажения сигнала с QPSK модуляцией обеспечивает различение фазового разбаланса при его величине более  $10^\circ$  и амплитудного разбаланса от 0,1.

4 Методика идентификации искажения сигнала с модуляцией QAM-16

обеспечивает возможность различать фазовый и амплитудный типы разбаланса квадратур, смещение сигнального созвездия и его нелинейное искажение при их величине от более чем  $5^\circ$ , отношении квадратур более 0,95 и смещении более 0,05 от квадратурной/синфазной составляющей символа созвездия с минимальной энергией.

5 Разработаны программы, позволяющие проводить анализ и расчет чувствительности радиоприемного тракта, а также определять изменение чувствительности при внесении искажений для цифровых видов модуляции.

6 Результаты работы внедрены в соответствующие разработки ООО «Тендерленд» и ООО «Автетикс» (г. Ярославль). Отдельные результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова в рамках дисциплины «Беспроводные сети связи». Все результаты внедрения подтверждены соответствующими актами.

**Достоверность результатов диссертационной работы** подтверждена использованием адекватного математического аппарата, результатами компьютерного моделирования, демонстрирующими эффективность предложенных алгоритмов и методик в идентификации искажений радиосигналов, а также апробацией в печати и на научных конференциях различного уровня.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных и научно-технических конференциях:

- XI, XII Международных конференциях «Перспективные технологии в средствах передачи информации», Владимир-Суздаль, 2015, 2017;
- Международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий», Москва, 2016;
- XIV, XIX Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение», Москва, 2012, 2017;
- Двадцать первой международной конференции FRUCT, Хельсинки, 2017.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 20 научных работ, из них 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов кандидатских и докторских диссертаций, одна работа включена в индексы цитирования Scopus и IEEE Explore, 16 докладов на научных конференциях; получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Личный вклад автора.** Выносимые на защиту положения предложены и реализованы автором самостоятельно в ходе выполнения научно-исследовательских работ на кафедре инфокоммуникаций и радиофизики Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и 4 приложений. Основное содержание работы изложено на 134 страницах. Список литературы включает 102 наименования. В работе представлено 76 рисунков и 2 таблицы.

#### **Основные научные положения и результаты, выносимые на защиту**

1 Алгоритм обнаружения и идентификации искажения сигнального созвездия на основе вектора ошибок для радиосигнала с модуляцией BPSK, обеспечивающий повышение помехоустойчивости телекоммуникационной системы до 1,3 дБ.

2 Методика идентификации искажения сигнального созвездия для

радиосигнала с модуляцией QPSK, обеспечивающая различие фазового разбаланса при его величине более  $10^\circ$  и амплитудного разбаланса от 0,1.

3 Методика идентификации типа искажения радиосигнала с модуляцией QAM-16, обеспечивающая возможность различить фазовый и амплитудный типы разбаланса квадратур, смещение сигнального созвездия и его нелинейное искажение при их величине от более чем  $5^\circ$ , отношении квадратур более 0,95 и смещении более 0,05 от квадратурной/синфазной составляющей символа созвездия с минимальной энергией.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы исследований, сформулированы цель и задачи исследований, изложены положения, выносимые на защиту, обоснованы научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** освещаются основные тенденции развития телекоммуникационных систем и устройств передачи информации, текущее состояние данной отрасли. Приводится подробный обзор существующих метрик оценки качества работы систем передачи цифровой информации, формулируются основные проблемы и возможные направления для улучшения их характеристик. Сформулированы предпосылки для проведения исследований и разработки предложенных в работе алгоритмов.

Решение указанных в работе задач рассмотрено в последующих трех главах.

**Во второй главе** представлен алгоритм идентификации искажения созвездия радиосигнала с BPSK модуляцией на фоне аддитивных шумов. Приводится его подробное описание и основные физические принципы работы. Приведено сравнение с наиболее распространенными на данный момент аналогами. Описаны методика тестирования и результаты работы алгоритма, в результате чего получена область его применимости.

С точки зрения обнаружения и идентификации при демодуляции фазоманипулированных (BPSK) радиосигналов наиболее сложным является поворот сигнального созвездия, поскольку его воздействие ухудшает помехоустойчивость системы, в то время как отношение сигнал-шум (ОСШ) в полосе фильтра основной селекции остается неизменным (рисунок 1).

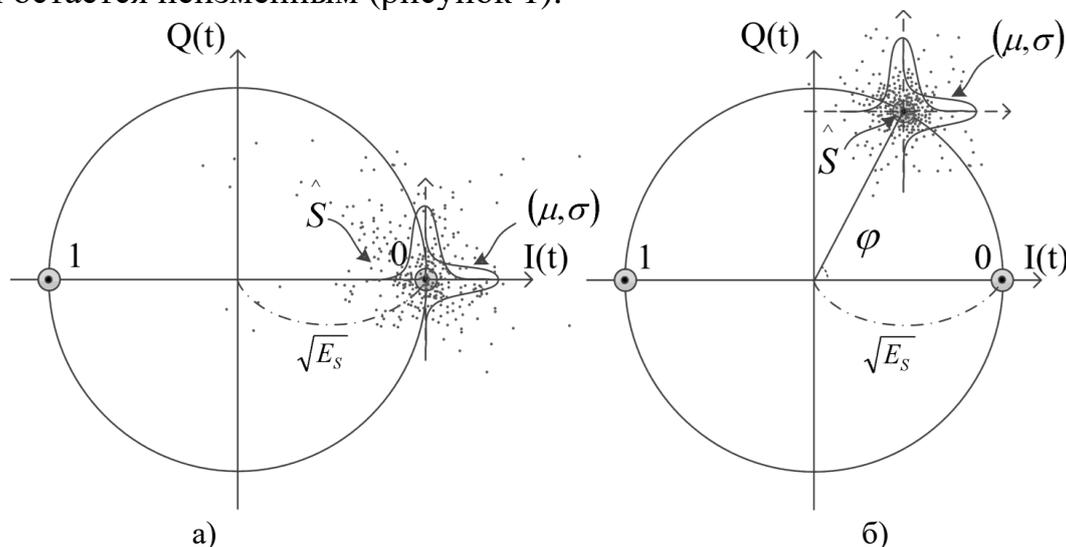
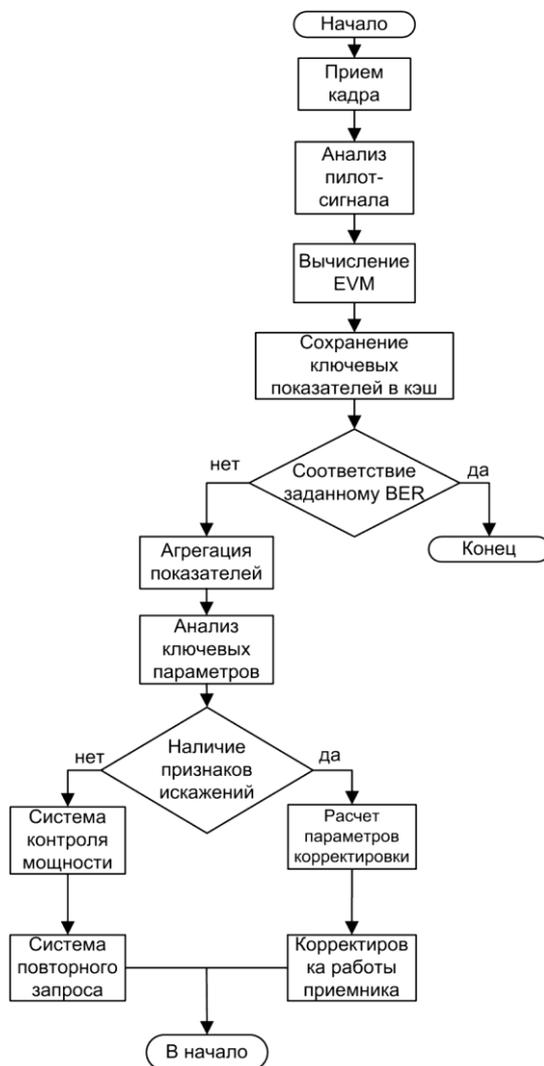


Рисунок 1 - Воздействие искажений квадратур на сигнальное созвездие: а) воздействие АБГШ; б) одновременное воздействие АБГШ и искажения созвездия

Искажения данного типа, как правило, проявляются из-за влияния аналогового тракта радиоприемного устройства, несовершенства системы синхронизации и т. п.

Алгоритм обнаружения и устранения влияния поворота сигнального созвездия базируется на применении двух метрик: эталонной метрики оценки шумового воздействия по пилот-сигналу и неэталонной метрики анализа вектора ошибок (*EVM*). Блок-схема указанного алгоритма приведена на рисунке 2.



**Рисунок 2 - Блок-схема алгоритма определения воздействия искажений и активации системы компенсации**

Рассмотрим более подробно особенности работы данного алгоритма. После посимвольного приема дискретного сообщения на выходе демодулятора имеются значения I и Q компонент принятого символа  $\hat{S}_i$ , которые сохраняются в буфере в виде следующих структур:

$$\hat{S}_i = \{I_i; Q_i\}.$$

На следующем этапе производится накопление элементов  $S_i$ , которые могут быть получены как из одного кадра, так и агрегированы из нескольких. После накопления кадра необходимой длины происходит нормировка вектора ошибок на среднюю мощность принятого радиосигнала и вычисление усредненного вектора ошибки. Коэффициент нормировки может быть записан следующим образом:

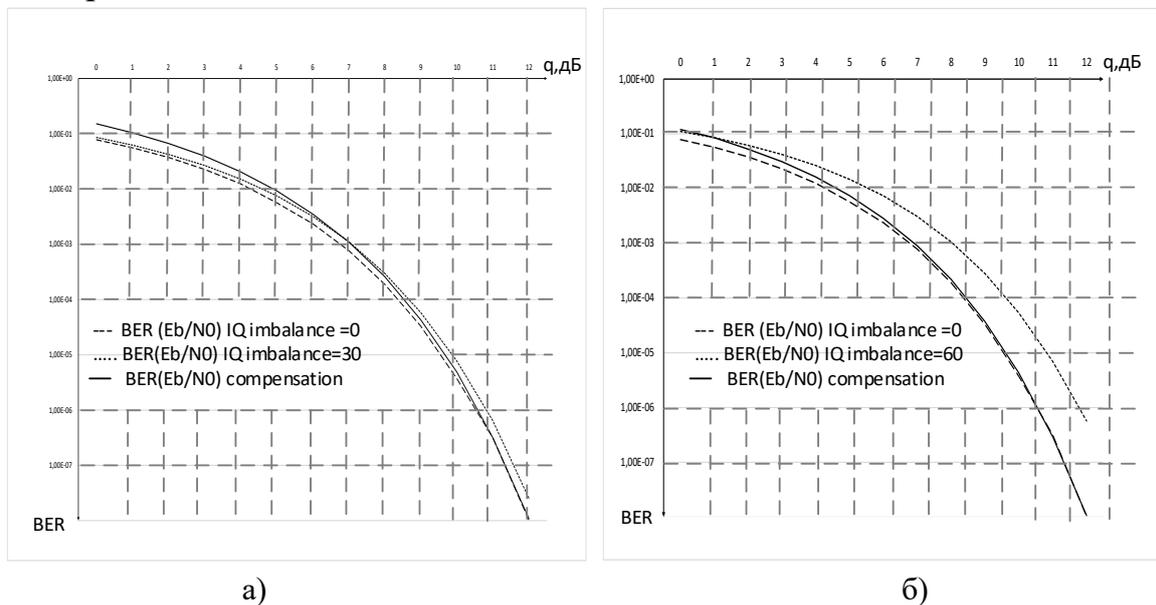
$$A = \sqrt{\left( \sum_{i=0}^k \frac{P(S_i)}{M} \right)^{-1}},$$

где  $M$  – порядок модуляции,  $P(S_i)$  – энергия принятого символа,  $k$  – размер кадра. Поскольку все символы радиосигнала BPSK имеют одинаковую энергию, зная величину вектора ошибки и коэффициент нормировки, можно компенсировать искажение созвездия:

$$\bar{\varphi}(k) = \arccos\left(\frac{1}{2} A \overline{EVM}(k) - \sqrt{\bar{E}_s}\right),$$

где  $k$  – размер кадра, на котором вычислен вектор ошибок,  $\bar{E}_s$  – усредненная энергия символа,  $\overline{EVM}$  – усредненное значение вектора ошибок, вычисленное при приеме кадра длиной 1024 бита.

На рисунке 3 приведены результаты работы алгоритма для величин угла поворота  $\frac{\pi}{6} \text{ рад}$  и  $\frac{\pi}{3} \text{ рад}$ , при величине кадра, на котором вычисляется вектор ошибки, равной 1024 бита. Здесь пунктирной линией с крупным штрихом изображена зависимость вероятности появления битовой ошибки от соотношения  $\frac{E_b}{N_0}$ , мелким пунктиром – при воздействии искажения, сплошной линией – при работе алгоритма компенсации.



**Рисунок 3 - Работа алгоритма компенсации для заданного угла поворота сигнального**

**созвездия: а)  $\frac{\pi}{6} \text{ рад}$ ; б)  $\frac{\pi}{3} \text{ рад}$**

Исходя из представленных зависимостей, можно сделать вывод, что при низких ОСШ в канале передачи алгоритм компенсации работает некорректно, т. к. вектор ошибки вычисляется неэталонно, следовательно, в том случае, когда символ принят ошибочно, в вычисление EVM будет внесена погрешность вне зависимости от размера кадра, на котором нормируется и вычисляется вектор ошибки.

Определим порог отношения  $\frac{E_b}{N_0}$  в канале передачи, при котором алгоритм

компенсации начинает давать выигрыш для различных величин угла поворота созвездия.

Для того чтобы решить задачу различения влияния АБГШ и поворота сигнального созвездия, рассмотрим поведение величины вектора ошибки  $EVM$ . На блок-схеме, приведенной на рисунке 2, в случае несоответствия  $BER$  заданным требованиям, производится вычисление  $EVM$  и сохранение показателей в буфере. При помощи правила Стерджеса имеющиеся в буфере данные разбиваются на интервалы, величина которых определяется следующим выражением:

$$l = \frac{\overline{EVM}_{\max} - \overline{EVM}_{\min}}{1 + \log_2(k)},$$

где  $\overline{EVM}_{\max}$  и  $\overline{EVM}_{\min}$  – максимальная и минимальная величина усредненного вектора ошибки, вычисленного при обработке кадра, длина которого равна 1024 бита,  $k$  – размер кадра. На следующем этапе происходит подсчет количества попаданий значений в буфере в каждый из интервалов  $L_i$ , абсолютные значения границ которого определяются следующим выражением:

$$L_i = \{\overline{EVM}_{\min} + li; \overline{EVM}_{\min} + l(i+1)\}.$$

В том случае, если сигнальное созвездия подвергается искажению при незначительном воздействии АБГШ, медиана распределения, представленного на гистограмме, будет смещена пропорционально величине искажения, в то время как разброс относительно нее будет незначительным. В противном случае будет наблюдаться обратная картина – значительный разброс по заданному порогу при минимальном смещении, т. к. по условиям моделирования математическое ожидание воздействующего на радиосигнал шума равно нулю.

Рассмотрим работу системы компенсации, рассчитанной на решение следующей задачи: минимизация влияния поворота сигнального созвездия, начиная с  $\frac{\pi}{6}$  рад, и соотношения  $\frac{E_b}{N_0}$ , равного 6 дБ. В результате серии экспериментов выбран следующий критерий активации: алгоритм компенсации задействуется в случае превышения эмпирически установленной величины разброса по частоте попадания отсчетов в интервал. На рисунке 4 представлена диаграмма работы алгоритма анализа состояния канала и компенсации.

Область работы алгоритма, в которой вносятся улучшения, ограничена сверху значением ОСШ, равным 11 дБ (пороговым значением, определяемым требованиями к ошибке в канале передачи), снизу – ОСШ, равным 6 дБ (границей работы критерия идентификации созвездия), слева предельной кривой для выбранной величины кадра.

**В третьей главе** исследуется влияние различных типов искажения на помехоустойчивость радиосигналов с более сложной модуляцией QPSK и приводится методика их идентификации.

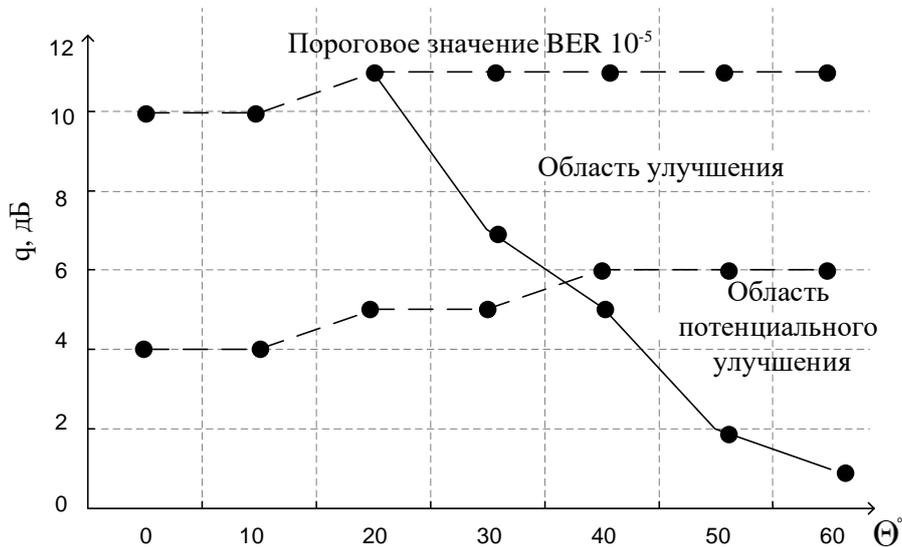


Рисунок 4 - Диаграмма работы алгоритма детектирования искажения и его компенсации

В случае фазового разбаланса квадратур сигналное созвездие будет искажено таким образом, что вероятность приема символов будет различна.

Рассмотрим более подробно фазовый разбаланс. Вероятность правильного приема и символьной ошибки будет различна для символов, передающих комбинации бит 00,11 и 10,01 (в случае кода Грея). Вероятность правильного приема символа, передающего 00

$$SER_{PHIMB}(R00) = \frac{1}{4} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} (1 + \sin(\Theta)) \right) \right]^2; \forall \Theta \in \left[ 0, \frac{\pi}{2} \right].$$

Полная вероятность символьной ошибки равна:

$$SER_{PHIMB}(ErrTotal) = 1 - SER_{PHIMB}(R00).$$

Вероятность приема символа 10 при передаче 00, равна вероятности приема символа 01:

$$SER_{PHIMB}(00,10) = \frac{1}{4} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} (1 + \sin(\Theta)) \right) \right] \cdot \left[ \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} (1 + \sin(\Theta)) \right) \right]; \forall \Theta \in \left[ 0, \frac{\pi}{2} \right].$$

Вероятность приема символа 11 при передаче символа 00 равна:

$$SER_{PHIMB}(00,11) = \frac{1}{4} \left[ \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} (1 + \sin(\Theta)) \right) \right]^2; \forall \Theta \in \left[ 0, \frac{\pi}{2} \right].$$

Для символа, передающего 01, соответственно получаем:

$$SER_{PHIMB}(R01) = \frac{1}{4} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} (1 - \sin(\Theta)) \right) \right]^2; \forall \Theta \in \left[ 0, \frac{\pi}{2} \right],$$

$$SER_{PHIMB}(01,11) = \frac{1}{4} \left[ \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{E_b}{N_0}} (1 - \sin(\Theta)) \right) \right] \cdot \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \sqrt{\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{E_b}{N_0}} (1 - \sin(\Theta)) \right) \right]; \forall \Theta \in \left[ 0, \frac{\pi}{2} \right],$$

$$SER_{PHIMB}(01,10) = \frac{1}{4} \left[ \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{E_b}{N_0}} (1 - \sin(\Theta)) \right) \right]^2; \forall \Theta \in \left[ 0, \frac{\pi}{2} \right],$$

где  $\Theta$  – угол разбаланса квадратур.

В случае искажения созвездия, описываемого амплитудным разбалансом, вероятность символьной ошибки будет идентична для всех символов и описываться выражениями:

$$SER_{AIMB}(00,01) = \frac{1}{4} \left[ \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \right] \cdot \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( k \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \right],$$

$$SER_{AIMB}(00,10) = \frac{1}{4} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \right] \cdot \left[ \operatorname{erfc} \left( k \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \right],$$

$$SER_{AIMB}(00,11) = \frac{1}{4} \left[ \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \right] \cdot \left[ \operatorname{erfc} \left( k \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \right],$$

$$SER_{AIMB}(R) = \frac{1}{4} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \right] \cdot \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( k \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \right],$$

где  $k$  – коэффициент, характеризующий степень амплитудного разбаланса квадратур.

Существует принципиальное отличие в поведении доминирующей ошибки при различных типах разбаланса. При амплитудном она будет симметрична, а именно, если при рассмотрении функции распределения символа, передающего  $\vec{S}(00)$ , будет преобладать ошибка  $\vec{S}(00-01)$ , то соответственно при рассмотрении функции распределения символа  $\vec{S}(01)$  наиболее вероятной будет ошибка  $\vec{S}(01-00)$ .

В случае фазового разбаланса будет наблюдаться иная картина. Блок-схема предложенной методики для этого случая представлена на рисунке 5.

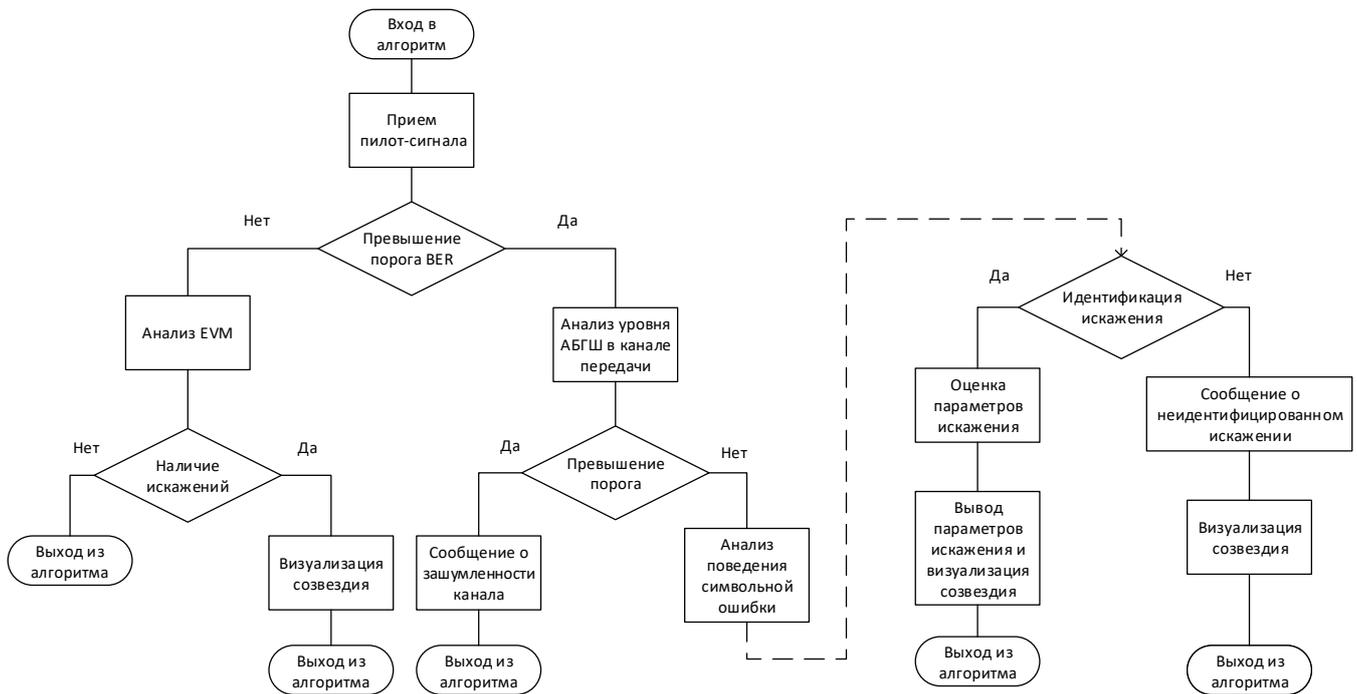


Рисунок 5 - Блок-схема работы методики в случае фазового разбаланса

На первом этапе происходит проверка соответствия вероятности битовой ошибки заданным к системе требованиям. В случае ее соответствия система считается работоспособной и осуществляется выход из алгоритма. В случае, если порог BER превышен, то необходимо определить, что является причиной ухудшения качества передачи информации.

Для решения задачи различения влияния АБГШ и поворота сигнального созвездия производится вычисление вектора ошибки  $EVM$  и сохранение показателей

в буфере. Разбиение принятых данных на интервалы и их анализ происходят аналогично алгоритму для радиосигнала с модуляцией BPSK.

В том случае, если на радиосигнал воздействует искажение при незначительном АБГШ, медиана распределения, представленного на гистограмме, будет смещена пропорционально воздействию искажения, в то время как разброс относительно нее будет незначительным. В противном случае будет наблюдаться обратная картина.

Амплитудным разбалансом будет признано искажение, при воздействии которого в переданном эталонном сообщении, содержащем комбинацию бит, определяющую равное количество всех символов сигнального созвездия, характер полученного эмпирического распределения для каждого из символов будет соответствовать одному из следующих типов, приведенных в таблице 1.

**Таблица 1 - Описание преобладающей ошибки для амплитудного разбаланса**

Тип 1		Тип 2	
Передаваемый символ	Преобладающая ошибка	Передаваемый символ	Преобладающая ошибка
$\vec{S}(00)$	$\vec{S}(00-10)$	$\vec{S}(00)$	$\vec{S}(00-01)$
$\vec{S}(01)$	$\vec{S}(01-01)$	$\vec{S}(01)$	$\vec{S}(01-00)$
$\vec{S}(11)$	$\vec{S}(11-01)$	$\vec{S}(11)$	$\vec{S}(11-10)$
$\vec{S}(10)$	$\vec{S}(10-00)$	$\vec{S}(10)$	$\vec{S}(10-11)$

В случае фазового разбаланса достаточным условием будет являться наличие в переданном эталонном сообщении, содержащем комбинацию бит, определяющую равное количество всех символов сигнального созвездия, преобладания ошибок при передаче символов одной из диагоналей сигнального созвездия (таблица 2). Пороговым значением здесь будет считаться двукратное преобладание.

**Таблица 2 - Описание преобладающей ошибки для фазового разбаланса**

Тип 1	Тип 2
$\vec{S}(00-11) > \vec{S}(10-01)$	$\vec{S}(00-11) < \vec{S}(10-01)$

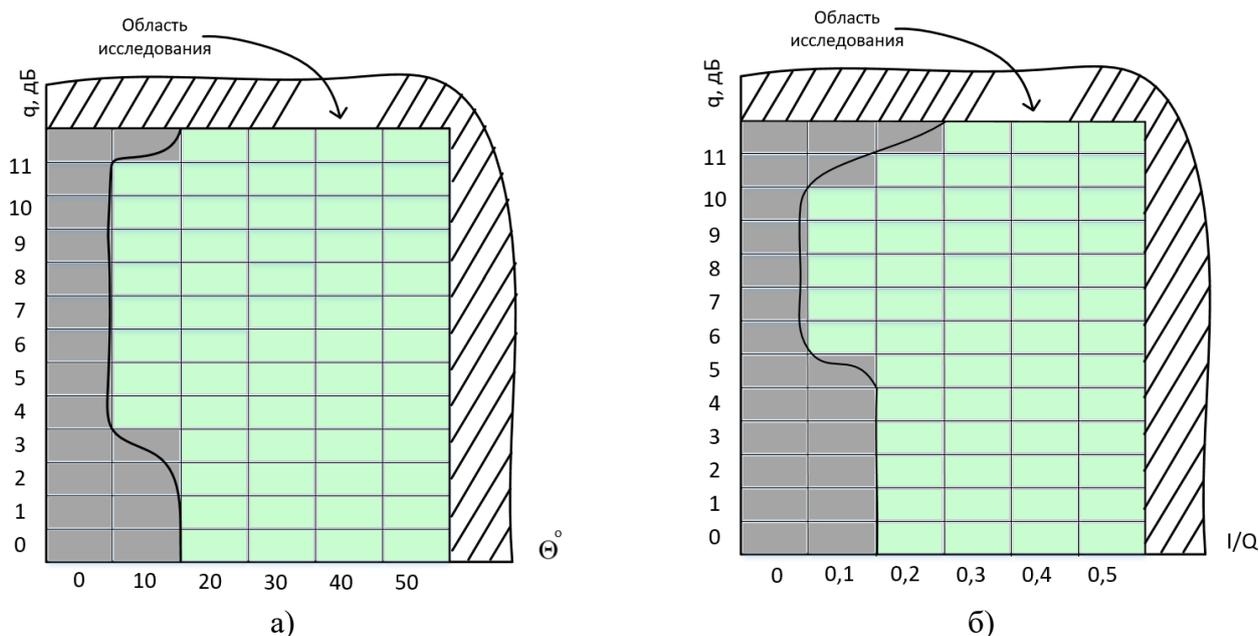
Ошибка будет считаться преобладающей в случае, если она будет составлять более 0,5 от общего количества случившихся ошибок. Приведем аналитическое выражение критерия:

$$P_m(k) = \sum_{k=0}^m \frac{m!}{k!(m-k)!} p_{prev}^k (1-p_{prev})^{m-k},$$

где  $P_{prev}$  – вероятность доминирующей ошибки,  $m$  – количество произошедших ошибок.

На рисунке ба приведена диаграмма работы методики в следующих условиях: угол фазового разбаланса изменяется в пределах от 0 до  $\frac{5\pi}{18}$ , соотношение  $\frac{E_b}{N_0}$

изменяется от 0 до 12 дБ, длина кадра, на котором вычисляется вектор ошибки, равна  $1024$  бита, количество переданных символов равно  $4 \cdot 10^7$ .



**Рисунок 6 - Диаграмма работы методики в условиях разбаланса: а) фазового; б) амплитудного**

На рисунке 6б приведена работа методики в следующих условиях: угол амплитудного разбаланса изменяется в пределах от 0 до 0,5 (-6 дБ), соотношение  $\frac{E_b}{N_0}$  изменяется от 0 до 12 дБ, длина кадра, на котором вычисляется вектор ошибки, равна  $1024$  бита, количество переданных символов –  $4 \cdot 10^7$ .

Установлено, что идентификация фазового разбаланса возможна при его величине более  $10^\circ$  и ОСШ более 6 дБ. В условиях амплитудного разбаланса наблюдаются схожие результаты, за исключением высоких значений ОСШ около 11-12 дБ при малых величинах разбаланса. Данное явление объясняется высокой помехоустойчивостью радиосигнала с модуляцией QPSK.

**В четвертой главе** исследуется влияние различных искажений на радиосигнал с еще более сложной модуляцией QAM-16, приводится методика идентификации искажений, воздействующих на данный радиосигнал.

Перейдем к рассмотрению таких искажений как разбаланс квадратур и смещение сигнального созвездия. Для того чтобы получить их математические модели, приведем аналитическую запись сигнала QAM-16:

$$S^i(t) = g_0(t) A_{kl} \cos(2\pi f_s t) + j g_0(t) A_{lQ} \sin(2\pi f_s t);$$

$$k, l \in 1.. \sqrt{M};$$

$$A_{kl}, A_{lQ} = \left\{ (2m-1 - \sqrt{M}) \right\};$$

$$g_0 = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{T}}; t \in [0, T]; \\ 0; t \notin [0, T] \end{cases}$$

где  $S^i(t)$  – текущее положение сигнального вектора, т. е. передаваемый в настоящий момент символ сигнального созвездия,  $A_{kI}, A_{kQ}$  – его координаты,  $f_s$  – несущая частота радиосигнала,  $T$  – период символа,  $g_0(t)$  – нормировочная функция. Введем в аналитическую запись сигнала QAM-16 модели искажений – смещения сигнального созвездия и разбаланса квадратур. Соответственно, получаем:

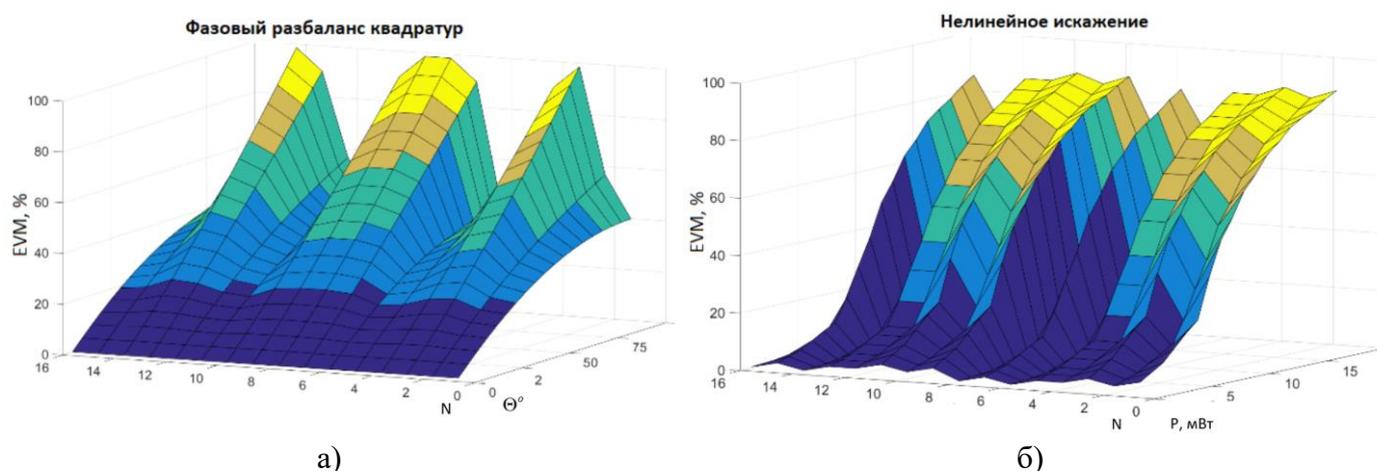
$$S^i(t) = g_0(t)(A_{kI} + ofs_I) \cos(2\pi f_s t) + jg_0(t)(A_{kQ} + ofs_Q) \sin(2\pi f_s t);$$

$$S^i(t) = g_0(t)A_{kI} \cos(2\pi f_s t + \varphi_{IMB}) + jg_0(t)A_{kQ} \sin(2\pi f_s t - \varphi_{IMB});$$

где  $ofs_I$  и  $ofs_Q$  – смещение по квадратурным осям,  $\varphi_{IMB}$  – фазовое смещение.

Как уже отмечалось, все вышеописанные метрики в чистом виде дают лишь информацию о степени искаженности радиосигнала и, следовательно, о помехоустойчивости системы передачи цифровой информации, но о природе искажения они информации не дают. Очевидно, что в случае вычисления на достаточно большом фрейме (кадре), одинаковые значения  $EVM$  могут быть получены путем введения в радиосигнал различных искажений.

Вычислим последовательно усредненную величину вектора ошибки для каждого символа сигнального созвездия. Длина фрейма, для которой проводится расчет, равна  $4 \cdot 10^7$  бит ( $10^7$  символов). На диаграммах рисунка 7 приведены результаты моделирования.



**Рисунок 7 - Диаграмма посимвольного изменения EVM в зависимости от степени искажения: а) фазовый разбаланс; б) нелинейное искажение**

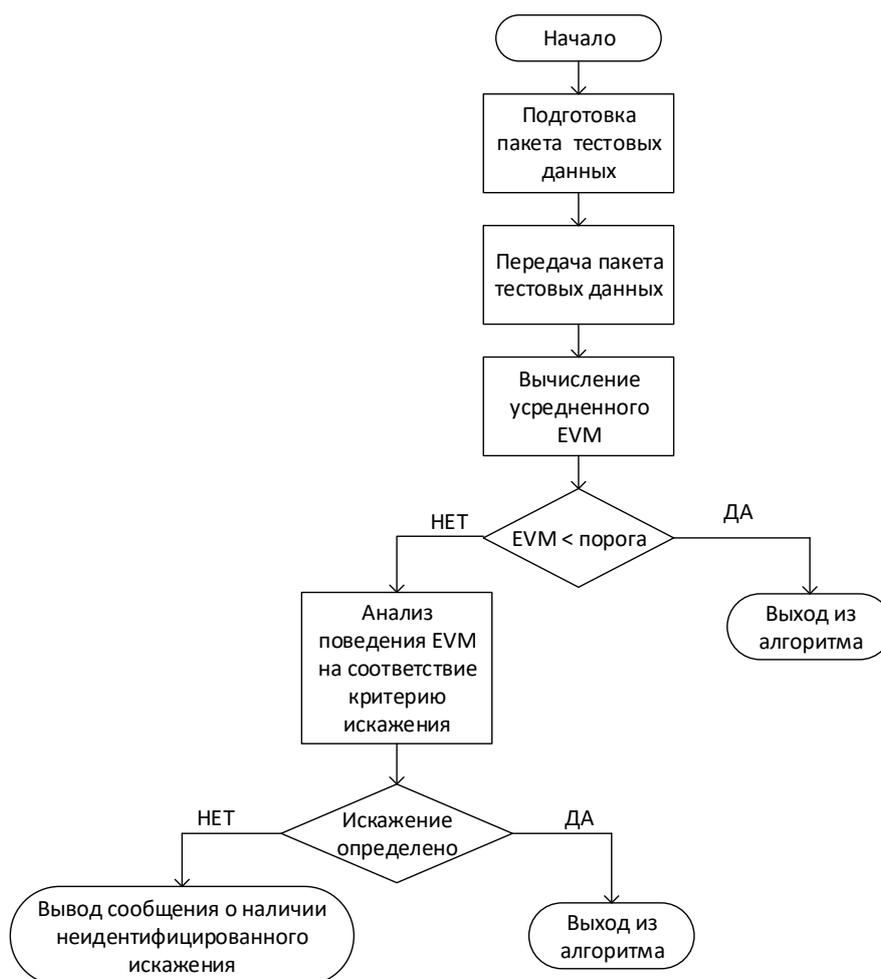
По вертикальной оси отложен вектор ошибок, выраженный в процентах, по фронтальной – номер символа, отражающий его позицию в сигнальном созвездии. Третья ось отражает в зависимости от графика либо угол разбаланса квадратур, либо мощность радиосигнала, подаваемого на усилитель мощности. Из представленных диаграмм видны очевидные различия в характере поведения вектора ошибки в зависимости от типа искажения радиосигнала. Возникает необходимость сформулировать критерии, на основе которых возможно различить искажения.

Выделим характерные особенности поведения вектора ошибок при каждом виде искажения, определим символы, для которых величина вектора ошибки будет максимальной или минимальной, а также характерные соотношения между ними. В случае фазового разбаланса, как представлено на рисунке 7а, наибольшему искажению подвергаются символы с номерами 2, 7, 8, 13, а менее искажены символы 3, 6, 9, 12.

В случае нелинейного искажающего воздействия (рисунок 7б) степень искажения определяется энергией символа, соответственно наиболее сильно будут искажены символы 0, 2, 8, 10, а наименьшему искажению будут подвержены символы 5, 7, 13, 15. Отметим, что при нелинейном искажении символы, имеющие одинаковую энергию, искажены одинаково, вне зависимости от их позиции в сигнальном созвездии, в отличие от фазового или амплитудного разбалансов.

При амплитудном разбалансе, введенном путем сжатия квадратурной оси, максимально искажены символы 4, 12, 6, 14. Это объясняется тем, что квадратурная составляющая преобладает при формировании символа и несет большую часть его энергии. В случае смещения созвездия наибольшее искажение претерпевают символы с наименьшей энергией.

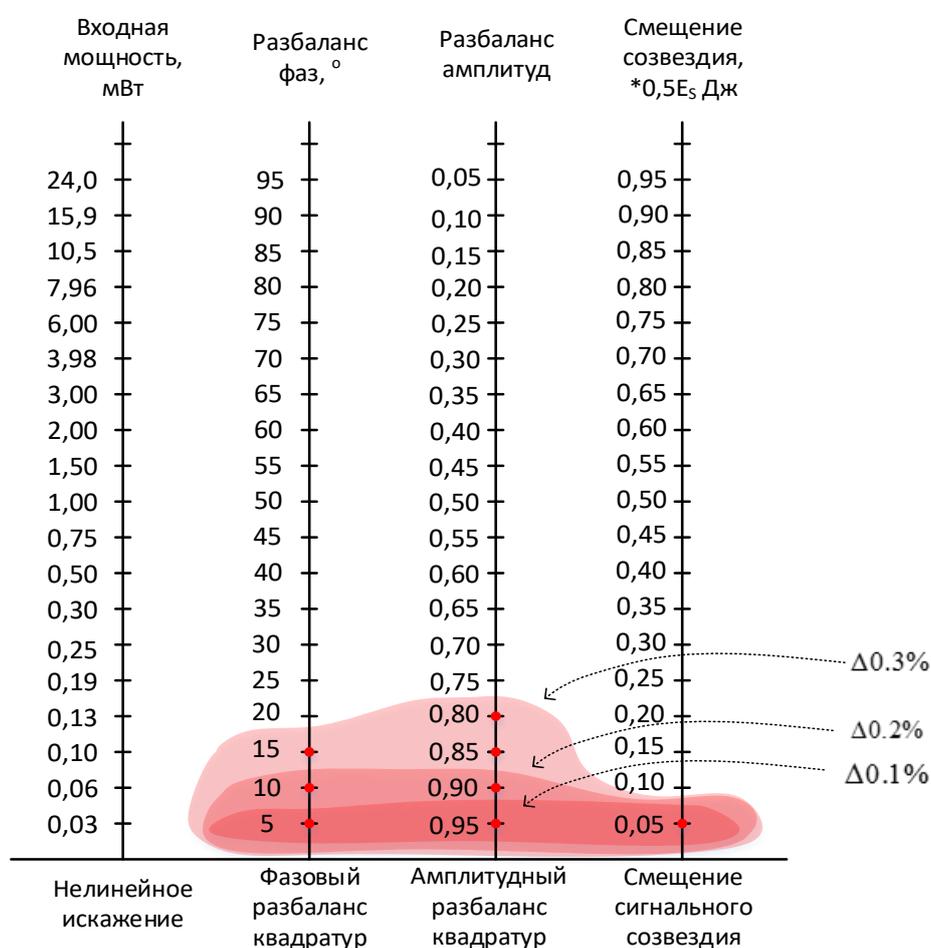
Рассмотрим более подробно алгоритм работы методики оценки качества радиосигнала на выходе передатчика (рисунок 8). Сначала необходимо сформировать пакет тестовых данных. Далее происходит передача данных при помощи тестируемого устройства и вычисляется вектор ошибки с использованием опорного радиосигнала. В случае если усредненный вектор ошибки не превышает заданного значения, качество радиосигнала считается удовлетворительным, в противном случае производится попытка идентифицировать искажение, а если это не удается, то производится вывод сообщения об ошибке.



**Рисунок 8 - Блок-схема работы системы идентификации искажений**

Определив все необходимые критерии для распознавания основных типов искажений и общие принципы работы системы идентификации, следует оценить

эффективность их работы. Установлено, что для усилительной характеристики Polyfet MLCQ-02 критерий успешно работает, начиная с усредненной мощности, поданной на усилитель и равной 0,03 дБм. Фазовый разбаланс детектируется, начиная с 10°. Для амплитудного разбаланса пороговым является отношение квадратур, равное – 0,9, для смещения сигнального созвездия – 0,1 от половины минимальной энергии символа. На рисунке 9 приведена диаграмма работы критериев при различных погрешностях измерения *EVM* и шумовой температуре усилителя, равной 290 К. Стоит отметить сильную зависимость идентификации фазового и амплитудного разбалансов от закладываемой в методику погрешности измерения. С практической точки зрения важным моментом является то, что, несмотря на громоздкую запись логических выражений, описывающих критерии распознавания искажений, они могут быть лаконично и эффективно реализованы при помощи большинства современных языков программирования.



**Рисунок 9 - Диаграмма рабочих областей критериев идентификации искажений**

Предложена методика идентификации искажения на выходе передатчика при анализе радиосигнала с модуляцией QAM-16, в основе которой лежит вычисление вектора ошибок.

Приведены критерии идентификации для основных типов искажений.

Проведено комплексное моделирование и оценка эффективности предложенной системы, в результате чего выявлена чувствительность предложенной методики к точности измерения вектора ошибки.

Граница срабатывания критерия определяется вводимым порогом разрешения  $\Delta$ . Установлено, что при снижении этого порога наибольшее ухудшение показателей работы методики наблюдается при идентификации фазового и амплитудного разбалансов. Точность идентификации нелинейного искажения сигнального созвездия и его смещения продемонстрировали меньшую зависимость от порога точности.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

На основании проведенных исследований в работе получены следующие основные результаты:

1 Разработан алгоритм детектирования и компенсации искажения сигнального созвездия с модуляцией BPSK, базирующийся на основе анализа вектора ошибок и статистических показателей системы передачи цифровой информации. Предложенный алгоритм позволяет различить влияние на помехоустойчивость телекоммуникационной системы искажения сигнального созвездия от воздействия АБГШ. Данный алгоритм обеспечивает повышение помехоустойчивости телекоммуникационной системы до 1,3 дБ. Установлено, что область работы алгоритма, в которой вносятся улучшения, ограничена сверху значением ОСШ, равным 11 дБ (пороговым значением, определяемым требованиями к ошибке в канале передачи), снизу – ОСШ, равным 6 дБ (границей работы критерия идентификации созвездия), слева – предельной кривой для выбранной величины кадра.

2 Разработана методика, действующая на основе комплексной оценки качества канала передачи информации и позволяющая определять наличие искажений и идентифицировать их тип в широком диапазоне ОСШ с заданной вероятностью, что позволяет повысить степень автоматизации процесса тестирования радиоэлектронного оборудования. Идентификация фазового разбаланса возможна при его величине более  $10^\circ$  и ОСШ более 6 дБ. В условиях амплитудного разбаланса наблюдаются схожие результаты, за исключением более высоких значений ОСШ – около 11–12 дБ, при малых величинах разбаланса. Данное явление объясняется высокой помехоустойчивостью радиосигнала с модуляцией QPSK.

Предложенная методика обладает высокой совместимостью с современными измерительными приборами, что позволяет осуществить ее внедрение в производство без дополнительных затрат.

3 Разработана методика, основанная на анализе поведения вектора ошибок, позволяющая не только оценить качество излучаемого передатчиком радиосигнала, но и идентифицировать тип искажения, воздействующего на радиосигнал с модуляцией QAM-16. Методика обеспечивает возможность различать фазовый и амплитудный типы разбаланса квадратур, смещение сигнального созвездия и его нелинейное искажение при их величине от более чем  $5^\circ$ , отношении квадратур более 0,95 и смещении более 0,05 от квадратурной/синфазной составляющей символа созвездия с минимальной энергией.

4 Предложена методика создания моделей радиоэлектронных устройств в среде Matlab Simulink, которые максимально точно соответствуют параметрам усилительного модуля, выбранного разработчиком, и позволяют оценить вносимые нелинейные искажения.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в изданиях, рекомендуемых ВАК

1. Кисельников А.Е., Дубов М.А., Приоров А.Л. Разработка алгоритма детектирования и компенсации искажения сигнального созвездия ФМН-2 на основе вектора ошибок // Цифровая обработка сигналов. 2016. № 1. С. 34–39.

2. Кисельников А.Е., Боев С.Ф., Приоров А.Л., Дубов М.А., Красавин К.С. Анализ помехоустойчивости системы связи с QPSK-модуляцией при искажении сигнального созвездия и идентификация типа искажения // Успехи современной радиоэлектроники. 2016. № 10. С. 3–14.

3. Кисельников А.Е., Приоров А.Л., Дубов М.А. Идентификация типа искажения сигнала QAM-16 // Успехи современной радиоэлектроники. 2017. № 7. С. 23–32.

### Статьи, индексируемые в Scopus

4. Kiselnikov A., Dubov M., Priorov A. Non-reference metrics and its application for distortion compensation // Proceedings of the 21th Conference of Open Innovations Association FRUCT'21 – Helsinki, Finland, 6–10 November, 2017. pp. 172–181.

### Доклады на российских и международных конференциях

5. Кисельников А.Е. Компенсация фазового разбаланса при квадратурной демодуляции сигналов с бинарной фазовой манипуляцией // ПТСПИ 2015. Матер. всерос. науч. конф. – Суздаль, 2015. С. 310–312.

6. Кисельников А.Е. Методика предварительного расчета параметров радиоприемных устройств в задаче обработки квадратурных сигналов // Матер. XIV Всерос. науч.-практ. конф. «Проблемы развития и применения средств ПВО на современном этапе. Средства ПВО России и других стран мира, сравнительный анализ» – Ярославль, 2012. С. 151–153.

7. Кисельников А.Е. Определение характерных типов искажений в радиочастотном тракте с помощью анализа вектора ошибок // Сб. тез. докл. 68-й всерос. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием. – Ярославль, Изд-во ЯГТУ, 2015. С. 260.

8. Кисельников А.Е., Дубов М.А., Тараканов А.Н. Применение вектора ошибок для анализа искажений, воздействующих на сигнал с BPSK // Междунар. конф. «Радиоэлектронные устройства и системы инфокоммуникационных технологий», посвященная дню радио. – М., С. 75–78.

9. Кисельников А.Е., Моисеев А.С. Моделирование усилительных модулей в среде Matlab-Simulink // Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA-2017): докл. 19-й междунар. конф. – М., 2017. Т. 2. С. 585–588.

10. Кисельников А.Е. Моделирование и анализ искажений квадратурных сигналов // ПТСПИ 2017. Матер. всерос. науч. конф. – Суздаль. 2017. С. 37–39.

11. Кисельников А.Е., Приоров А.Л. Разработка измерительных комплексов с использованием Instruments Control Toolbox на базе программного пакета MATLAB // Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA-2019): докл. 21-й междунар. конф. – М., 2019. Т. 2. С. 434–436.

12. Кисельников А.Е. Реализация высокозащищенных систем связи // Сб. тез. докл. 65-й всерос. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием. – Ярославль, Изд-во ЯГТУ, 2012. Т. 1. С. 365.

13. Кисельников А.Е., Усс М.О., Шидловский Д.Ю. Разработка систем связи стандарта 5g с применением инструментария 5g toolbox программного пакета MATLAB // Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPА-2019): докл. 21-й междунар. конф. – М., 2019. Т. 2. С. 455–462.

14. Кисельников А.Е. Определение наличия разбаланса квадратур в приемнике при демодуляции BPSK сигнала // Информационно-телекоммуникационные системы и технологии (ИТСиТ): тез. всерос. конф. – Кемерово, КузГТУ, 2015. [Электронный ресурс] <https://sibscience.ru/page/ITSIT-2015/ITSIT/3-Prikladnye-informacionnye-tehnologii/3009.pdf> (Дата обращения 26.01.2020).

15. Кисельников А.Е., Полянин Ю.В., Якушев В.С. Анализ применимости концепций реализации цифровых ССШС в портативных устройствах // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы VIII всерос. науч.-техн. конф. – Рязань, 2012. С. 223–224.

16. Кисельников А.Е., Кандрин А.Е. Широкополосные системы связи уровня тактического звена управления // Путь в науку: сб. тез. междунар. студ. науч. конф. – Ярославль, 2012. С. 47.

17. Кисельников А.Е., Полянин Ю.В., Будников И.А. Реализация систем связи с технологией ППРЧ на ПЛИС // Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPА-2012): докл. 14-й междунар. конф. – М., 2012. Т. 2. С. 381–383.

18. Кисельников А.Е. Оптимизация модуляции и кодирования в беспроводных каналах связи // Сб. тез. докл. 64-й всерос. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием. – Ярославль, Изд-во ЯГТУ, 2011. С. 321.

19. Кисельников А.Е. Детектирование ухода частоты гетеродина при передаче квадратурных сигналов на основе анализа вектора ошибок EVM // Путь в науку: сб. тез. междунар. студ. науч. конф. – Ярославль, 2015. С. 105.

20. Кисельников А.Е., Полянин Ю.В. Разработка модуля расширения стыков для организации взаимодействия по проводным интерфейсам предыдущего поколения // Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPА-2014): докл. 16-й междунар. конф. – М., 2014. Т. 2. С. 676–679.

### **Программы для ЭВМ**

1. Кисельников А.Е., Приоров А.Л. RF\_calc 1.66 – программа для расчета параметров цифровых приемников. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018660082 от 16 августа 2018.

Подписано в печать 27.01.2020 г. Формат 60×84 1/16. Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе

Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова  
150003, Ярославль, ул. Советская, 14