

На правах рукописи

Хасьянова Елена Равыловна

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ КОМПЕНСАЦИИ
ПОГРЕШНОСТЕЙ КВАДРАТУРНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
В ЦИФРОВЫХ РАДИОПРИЕМНИКАХ
С НУЛЕВОЙ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЧАСТОТОЙ**

Специальность: 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ).

Научный руководитель: Пестряков Александр Валентинович – доктор технических наук, профессор, декан факультета «Радио и телевидение» МТУСИ

Официальные оппоненты: Тихомиров Николай Михайлович – доктор технических наук, Акционерное общество «Концерн «Созвездие», начальник научно-технического управления

Мазепа Роман Богданович – кандидат технических наук, профессор, НИУ «Московский авиационный институт», заведующий кафедрой «Радиосистемы и комплексы управления, передачи информации и информационная безопасность»

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие Ордена Трудового Красного Знамени «Научно-исследовательский институт радио»

Защита состоится «27» июня 2019 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 219.001.04 при ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» по адресу: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а, ауд. А-448 (малый зал заседаний).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МТУСИ
<http://www.srd-mtuci.ru/images/Dis-Hasyanova/dis-Hasyanova.pdf>

Автореферат разослан « ___ » _____ 2019 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д219.001.04
кандидат технических наук, доцент

Максим Валерьевич Терешонок

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Диссертация посвящена анализу и разработке методов компенсации погрешностей квадратурного преобразования в цифровых радиоприемниках с нулевой промежуточной частотой. Такая архитектура радиоприемного устройства обладает рядом преимуществ по сравнению с супергетеродинной схемой: простота структуры, возможность обеспечения широкополосного приема и многостандартного режима работы, отсутствие побочных каналов приёма, исключение сложного тракта обеспечения селективности на промежуточной частоте. Однако конструктивные особенности высокочастотного (ВЧ) тракта приемника прямого преобразования приводят к появлению сдвига постоянной составляющей (DC-смещения сигнала), ограничивающего чувствительность радиоприемника, возникновению сдвига несущей частоты из-за рассогласования частот задающих генераторов приемника и передатчика. Кроме того, в таких радиоприемных устройствах возможно возникновение амплитудно-фазового рассогласования квадратурных каналов (I/Q-разбаланс), наличие которого приводит к деградации показателя битовой ошибки (BER). Асимметрия квадратурных каналов современных аналоговых преобразователей частоты, согласно спецификации элементной базы ведущих мировых производителей, составляет $0,2 \dots 2 \%$ и $0,2 \dots 2^\circ$ (по амплитуде и фазе, соответственно). Таким образом, даже при использовании современной технологии производства интегральных схем, не все погрешности преобразования удаётся свести к приемлемому уровню.

Современным принципом снижения влияния указанных погрешностей аналогового ВЧ-тракта является их цифровая компенсация. Стоит отметить, что для компенсации сдвига постоянной составляющей эффективны и применяемые аналоговые методы, в частности ВЧ-фильтры. Анализ существующих методов в области цифровой компенсации сдвига постоянной составляющей показывает, что в основном они сводятся к оценке данной погрешности методом статистического усреднения. Актуальной является задача оценки эффективности и скорости сходимости этого алгоритма с сигналами современных типов модуляции.

Анализ существующих способов оценки амплитудно-фазового разбаланса показывает, что, несмотря на кажущееся многообразие методов, актуальной является задача разработки алгоритма компенсации амплитудно-фазового разбаланса квадратурных составляющих, который будет обеспечивать компенсацию этой погрешности в отсутствие априорных знаний о канале, а также обладать более быстрой сходимостью по сравнению с существующими методами. Также необходима количественная оценка уровня влияния амплитудно-фазового разбаланса на снижение уровня подавления помехи соседнего канала для сигналов, используемых в современных стандартах радиосвязи, чтобы определить в каких случаях компенсация требуется, а в каких достаточным является применение современных способов кодирования сигнала.

Степень разработанности темы. Проблематике компенсации погрешностей квадратурного преобразования посвящено достаточно много работ и исследования в этой области продолжаются до сих пор. Первопроходцем в этой области является финский ученый Валкама М. (Valkama M). Дальнейшим развитием предложенных им методов для многочастотных (OFDM) и многоантенных (MIMO) систем занимались такие ученые как Виндиш М. (Windisch M.) и Зоу Й. (Zou Y.). Идея применения метода адаптивной фильтрации к компенсации амплитудного разбаланса принадлежит Анттиле Л. (Anttila L.). Также стоит отметить Рукачевского П. (Rukaszewski P.), предложившего метод статистического усреднения для оценки и компенсации I/Q-разбаланса. Среди отечественных учёных наибольший вклад внесли такие ученые МТУСИ, как Пестряков А. В., Поборчая Н.Е. и Макаров Е. В.

Доступные в печати публикации, посвященные оценке влияния и компенсации искажений квадратурного преобразования, зачастую имеют разрозненный подход и не всегда учитывают степень влияния фазовых шумов на работу предлагаемых алгоритмов. Кроме того, в ряде публикации отсутствуют рекомендации по практическому применению предложенных алгоритмов оценки. Из этого следует, что существует необходимость в классификации методов оценки погрешностей квадратурного преобразования и исследовании возможности их применения при прохождении сигнала через радиоканал.

Целью работы является разработка рекомендаций по применению различных методов компенсации погрешностей квадратурного преобразования в цифровых радиоприемниках с нулевой промежуточной частотой, а также разработка алгоритма компенсации амплитудно-фазового разбаланса квадратурных составляющих при отсутствии априорных знаний о канале.

Задачи диссертационной работы, решаемые для достижения поставленной цели:

- анализ существующих методов компенсации сдвига постоянной составляющей, амплитудно-фазового разбаланса и сдвига несущей частоты. Определение наиболее перспективных для исследования методов компенсации;

- создание имитационной модели, учитывающей погрешности квадратурного преобразования, воздействия аддитивных и фазовых шумов и параметров радиоканала;

- исследование влияния погрешностей квадратурного преобразования на изменение качества приема сигналов в условиях воздействия не только аддитивной шумовой помехи, но и при воздействии фазовых шумов опорных генераторов сигналов;

- разработка метода компенсации амплитудно-фазового разбаланса квадратурных составляющих, который может обеспечить приемлемый уровень компенсации разбаланса для высоких порядков модуляции при отсутствии априорных знаний о канале;

- оценка эффективности разработанного метода, в том числе и с учётом его технической реализации на ПЛИС.

Научная новизна диссертационной работы.

1. Впервые получена оценка влияния погрешностей квадратурного преобразования на снижение уровня селективности для радиоприемника с нулевой промежуточной частотой.

2. Найдены предельные ограничения на сложность используемых типов модуляции, начиная с которых требуется применение методов компенсации, так как погрешности приводят к необратимым изменениям из-за ограниченной точности современной элементной базы.

3. Доказана перспективность использования метода анализа независимых компонент (АНК) для компенсации амплитудно-фазового разбаланса квадратурных составляющих. Применение метода АНК позволяет осуществить компенсацию в отсутствие априорных знаний о канале.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы

Теоретическая значимость работы состоит в следующем:

– обоснована необходимость разработки метода компенсации амплитудно-фазового разбаланса, обеспечивающего приемлемый уровень компенсации для сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ-16, -64, -128, -256);

– оценена эффективность применения алгоритмов компенсации погрешностей квадратурного преобразования, которая обеспечивает возможность выбора компромиссного решения в зависимости от условий работы радиоприемного устройства;

– доказана эффективность алгоритма компенсации амплитудно-фазового разбаланса, основанного на методе анализа независимых компонент.

Практическая значимость работы заключается в:

– выработке практических рекомендаций по применению проанализированных и разработанных алгоритмов компенсации;

– разработке и доведении до возможности реализации на современной элементной базе алгоритма оценки амплитудно-фазового разбаланса квадратурных составляющих, который может применяться как при разработке радиоприемников с нулевой промежуточной частотой, так и в действующих устройствах при наличии в них программной части;

- использовании результатов работы в аппаратно-программном комплексе «Вектор» для учебного процесса кафедры РОС, в НИР «Комплекс», выполненный в МТУСИ и в СЧ ОКР «УКЛ», выполненный в ООО «Радиокомп».

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач была применена теория помехоустойчивого приема, методы линейной алгебры, статистической радиотехники, цифровой адаптивной фильтрации, численные методы аппроксимации и методы компьютерного моделирования, в частности метод Монте-Карло.

Апробация результатов диссертационной работы.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества» (Москва, 2012-2016 гг.), международной научно-технической конференции «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях» «СИНХРОИНФО» (2011-2018 гг.) и международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационный технологии» (Севастополь, 2014-2017 гг.).

Публикации результатов диссертационной работы. По материалам диссертации имеется пять публикаций в рецензируемых периодических изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией – журналах «Электросвязь» (2013-2015 гг.) и «Т-Comm – Телекоммуникации и транспорт» (2013, 2017, 2018 гг.). Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Наличие амплитудного разбаланса влияет на величину избирательности приемника по соседнему каналу. Проведенные эксперименты показывают, что вероятность битовой ошибки при амплитудном разбалансе в 1 дБ и наличии помех от соседних каналов, которые в отсутствие разбаланса не влияют на качество приема, увеличивается на 1,3,4 или 5 порядков для сигналов с модуляцией КАМ-16, -64, -128 и -256 соответственно.

2. Предложенный алгоритм обеспечивает компенсацию амплитудно-фазового разбаланса для сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ-16, -64, -128,-256) без использования тестовой последовательности при выборке до 4096 отсчетов и в отсутствие априорных знаний о канале.

3. Разработанный алгоритм компенсации амплитудно-фазового разбаланса квадратурных составляющих позволяет уменьшить требуемое отношение сигнал/шум на бит на 1,6 дБ при работе с сигналом КАМ-128 для достижения вероятности битовой ошибки 10^{-4} по сравнению с классическим статистическим методом и имеет величину остаточной ошибки по фазе $0,09^\circ$.

Достоверность. Достоверность результатов, полученных в ходе выполнения диссертации, подтверждается соответствием экспериментальных результатов с результатами теоретического анализа и имитационного моделирования.

Личный вклад. Все результаты, сформулированные в основных положениях, выносимых на защиту, получены автором самостоятельно. Из работ, опубликованных в соавторстве, в диссертацию включена та их часть, которая получена автором лично.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 89 наименований и четырех приложений, содержит 113 страниц, включая приложения, 68 рисунков и 20 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы и положения, выносимые на защиту, определена структура разделов диссертации. Кроме того, в этом разделе содержатся сведения о публикациях и апробации работы.

В первом разделе проведен анализ методов компенсации погрешностей аналогового квадратурного преобразования для приемников с нулевой промежуточной частотой.

В начальной части раздела рассмотрены возможные архитектуры аналогового тракта радиоприемного устройства, применяемые в современных устройствах приема и обработки сигналов. На основании проведенного анализа сделан вывод о том, что приемник прямого преобразования с квадратурной обработкой сигналов теоретически является оптимальным для построения многостандартного и многодиапазонного радиоприемного устройства. На практике погрешности квадратурного преобразования и смещение сигнала из-за наличия постоянной составляющей требуют своевременной оценки и компенсации.

Далее рассмотрена математическая модель радиоканала приемников с нулевой промежуточной частотой, учитывающая погрешности квадратурного преобразования: амплитудно-фазового разбаланса, сдвига постоянной составляющей, сдвига несущей частоты и наличие фазовых шумов синтезаторов частот; а также способы их визуального наблюдения. Математическая модель принимаемого сигнала в матричной форме с учетом амплитудно-фазового разбаланса имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} x'_{I\Phi НЧ} \\ x'_{Q\Phi НЧ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1+g) \cos \Delta\varphi & (1+g) \sin \Delta\varphi \\ (1-g) \sin \Delta\varphi & (1-g) \cos \Delta\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{I\Phi НЧ} \\ x_{Q\Phi НЧ} \end{bmatrix} \quad (1)$$

где: $x_{I\Phi НЧ}$, $x_{Q\Phi НЧ}$ – квадратурные составляющие без амплитудно-фазового разбаланса;

$x'_{I\Phi НЧ}$, $x'_{Q\Phi НЧ}$ – квадратурные составляющие с учетом амплитудно-фазового разбаланса;

$(1+g$ и $1-g)$ – значение амплитудного разбаланса квадратурных составляющих;

$(+\Delta\varphi_{IQ}$ и $-\Delta\varphi_{IQ})$ – фазовый разбаланс квадратурных составляющих.

После осуществления аналого-цифрового преобразования (АЦП) квадратурные компоненты с учетом влияния сдвига несущей частоты, фазовых шумов синтезатора частот, амплитудно-фазового разбаланса выглядят следующим образом:

$$x_I(n) = (1+g)A \sum_{i=1}^n g(t_k - nT) [I_{nq} \sin(2\pi\Delta f_n + \Delta\varphi_n + \varphi_{un}) + J_{nq} \cos(2\pi\Delta f_n + \Delta\varphi_n + \varphi_{un})] + DC_I \quad (2a)$$

$$x_Q(n) = (1-g)A \sum_{n=1}^k g(t_n - nT) [I_{nq} \sin(2\pi\Delta f_n + \varphi_{un}) + J_{nq} \cos(2\pi\Delta f_n + \varphi_{un})] + DC_Q \quad (2б)$$

Здесь: $x_I(n)$, $x_Q(n)$ – квадратурные составляющие после АЦП, $(1+g$ и $1-g)$ – значение амплитудного разбаланса квадратурных составляющих; $(+\Delta\varphi_n$ и $-\Delta\varphi_n)$ – фазовый разбаланс квадратурных составляющих; Δf_n – значение сдвига несущей частоты; φ_{un} – составляющая фазовых шумов синтезатора частот; DC_I , DC_Q – величина сдвига постоянной составляющей.

Сравнительный анализ методов компенсации погрешностей квадратурных демодуляторов позволил провести классификацию способов оценки и коррекции разбаланса квадратурных составляющих с использованием алгоритмов цифровой обработки сигналов (Рисунок 1).

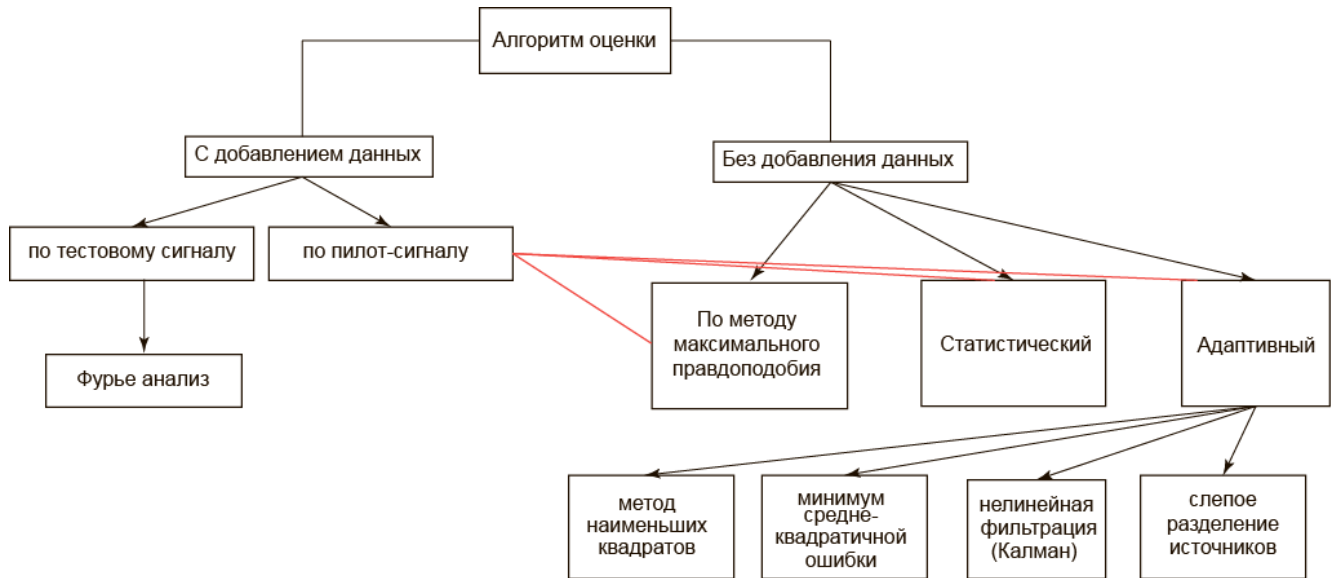


Рисунок 1 – Классификация возможных способов коррекции погрешностей квадратурного преобразования в радиоприемнике

На основании приведенного анализа отмечено, что при проведении исследований зачастую не учитывается уровень влияния фазовых шумов синтезаторов частот, не рассматриваются типы модуляции выше КАМ-64. Во многих публикациях отсутствуют рекомендации по практическому применению предлагаемых алгоритмов оценки.

Во втором разделе исследована степень влияния погрешностей квадратурного преобразования на качество принимаемого сигнала.

С применением возможностей SIMULINK и MATLAB была создана имитационная модель (Рисунок 2), учитывающая влияние погрешностей квадратурного преобразования. Исследования проводятся для сигналов с М-КАМ модуляцией, имеющей индексы 4...256. Это обусловлено широким распространением таких типов модуляции в современных системах мобильной и спутниковой связи.

С использованием этой модели были построены кривые вероятности битовой ошибки с учетом влияния амплитудно-фазового разбаланса и сдвига постоянной составляющей для типов модуляции КАМ-4...КАМ-256 в линии связи без кодирования, со сверточным и с турбокодированием, найдены пороговые значения сдвига постоянной составляющей и амплитудно-фазового разбаланса.

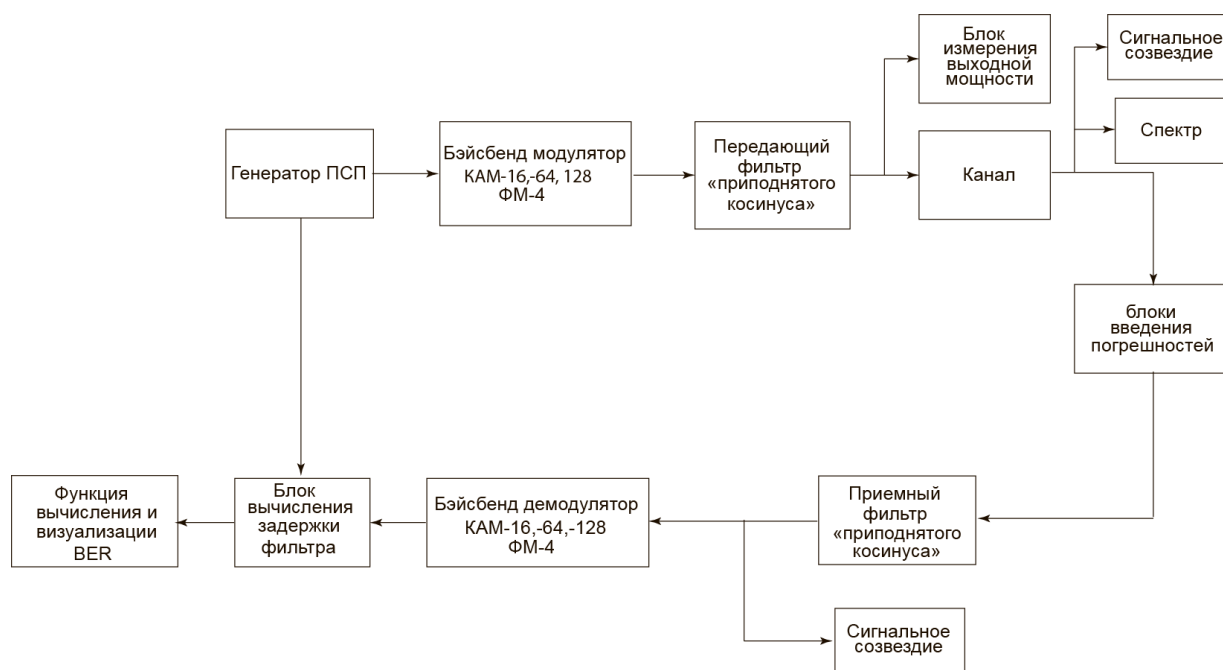


Рисунок 2 – Общая структура имитационной модели для исследования влияния погрешностей квадратурного преобразования на качество приема сигнала

I/Q-разбаланс для случая КАМ-4 требует увеличения отношения сигнал/шум на бит (E_b/N_0) всего на 0,3 дБ для достижения вероятности битовой ошибки (BER) 1×10^{-5} . Однако для КАМ-16 это значение равно уже 2,2 дБ. В случае КАМ-64 разница между идеальным случаем и наличием I/Q-разбаланса составляет 3дБ. Для сигналов КАМ-128, -256, при 1 дБ амплитудного разбаланса, для достижения вероятности битовой ошибки 4×10^{-5} требуется увеличение отношения сигнал/шум более чем на 10 дБ. Более того, наличие амплитудного разбаланса в 0,5 дБ для сигнала с модуляцией КАМ-128 обуславливает необходимость увеличения отношения сигнал/шум на 3,25 дБ для достижения вероятности битовой ошибки 1×10^{-5} . Для КАМ-256 амплитудный разбаланс в 0,5 дБ также является существенным фактором снижения качества приема, поскольку достижение $BER=1 \times 10^{-3}$ возможно при значении $E_b/N_0=25$ дБ, в то время как в идеальном случае требуемое отношение E_b/N_0 составляет 19,2 дБ. Сдвиг постоянной составляющей оказывает существенное влияние на качество приема сигнала и требует обязательной компенсации. Например, достижение BER в 1×10^{-5} при наличии в приемнике небольшого DC-смещения, равного 10 мВ, требует увеличения отношения сигнал шум на 1,8 дБ для сигнала с КАМ-64 модуляцией, на 2,7 дБ для КАМ-128 и на 6,7 дБ для сигнала с модуляцией КАМ-256. На основании этих наблюдений и проведенных исследований по поиску граничных значений величины сдвига постоянной составляющей можно заключить, что остаточная величина DC-смещения после работы компенсационного алгоритма должна составлять не более 0,003 В (для КАМ-256).

В третьем разделе проведено исследование алгоритмов оценки и компенсации погрешностей квадратурного преобразования с применением имитационного моделирования и разработан компенсатор амплитудно-фазового разбаланса на основе метода «слепого» разделения источников.

По результатам анализа, проведенного в первой главе, выявлена необходимость уточнения эффективности и скорости сходимости статистических методов и метода адаптивной линейной фильтрации при учете влияния фазовых шумов. Для оценки эффективности методов статистического усреднения и методов адаптивной линейной фильтрации применяется модель, разработанная во второй главе для исследования уровня влияния погрешностей квадратурного преобразования на изменение качества приема входного сигнала (Рисунок 2). Прототипом для модели фазовых шумов выбран синтезатор частот 1508ПЛ9Т, с управляемым по частоте генератором в диапазоне частот, типичном для систем мобильной связи.

Для оценки и удаления амплитудно-фазового разбаланса и сдвига постоянной составляющей с применением метода статистического усреднения использованы следующие соотношения:

$$g = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n r_Q'^2(k)}{\sum_{k=1}^n r_I'^2(k)}} \quad (3)$$

где g - величина разбаланса ; r_I' - отсчеты синфазной составляющей принимаемого сигнала, r_Q' - отсчеты квадратурной составляющей принимаемого сигнала.

$$\Delta\varphi = \arctan \left(\frac{\sum_{k=1}^n r_I'(k) * r_Q'(k)}{\sum_{k=1}^n r_I'^2(k)} \right) \quad (4)$$

$\Delta\varphi$ - значение фазового разбаланса

$$DC_I = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n r_I'(k), DC_Q = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n r_Q'(k) \quad (5)$$

Получены результаты среднеквадратичной ошибки оценки амплитудно-фазового разбаланса и сдвига постоянной составляющей при количестве отсчетов 512...16384 для модуляций КАМ-16...-256. Также для этих типов сигналов получены кривые вероятности битовой ошибки, позволяющие сделать вывод о том, для каких типов модуляции даже в случае канала с аддитив-

ным белым гауссовским шумом (АБГШ) требуется использование другого способа оценки и компенсации.

Для модуляции КАМ-64 достижение вероятности битовой ошибки в 1×10^{-4} после компенсации возможно при увеличении E_b/N_0 на 0,6 дБ, по сравнению с идеальным случаем (Рисунок 3). Значения остаточной ошибки разбаланса по амплитуде являются приемлемыми для n начиная от 2048 и более (Таблица 1).

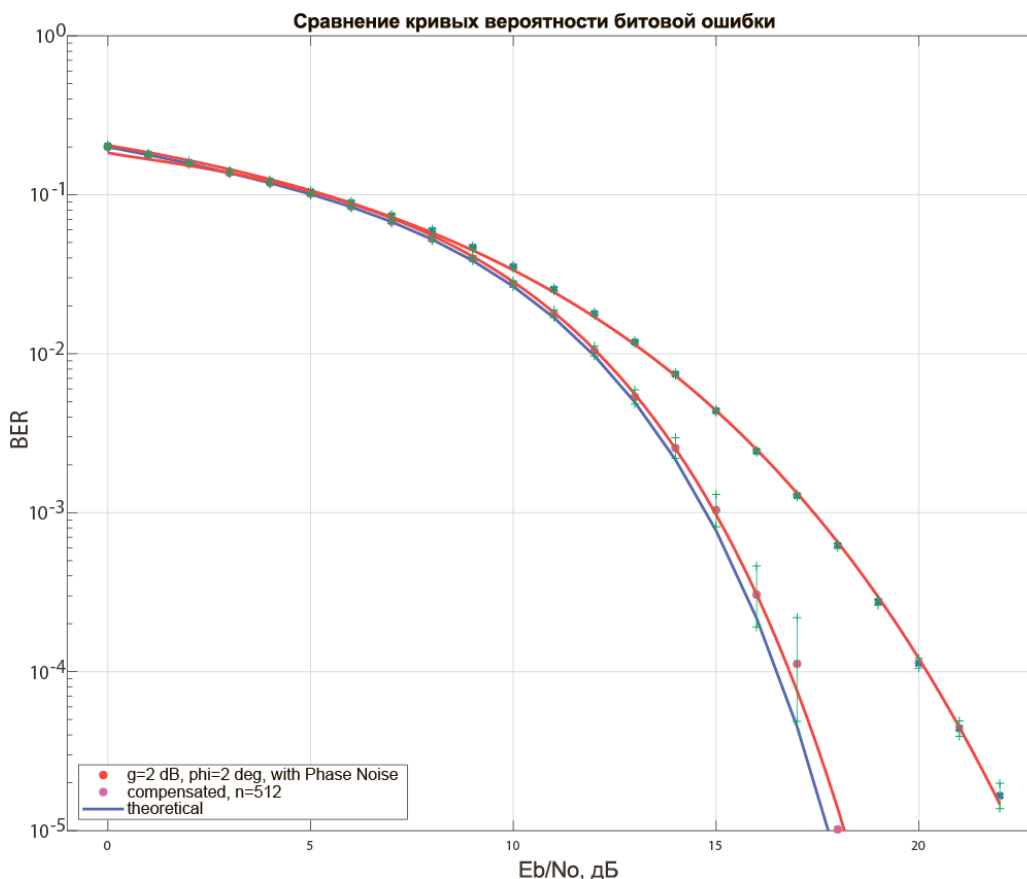


Рисунок 3 – Кривые вероятности битовой ошибки для сигналов с модуляцией КАМ-64 с учетом фазового шума при воздействии амплитудного разбаланса $g=2$ дБ и фазового разбаланса $\Delta\varphi=2^\circ$ и после компенсации разбаланса, оцененного методом статистического усреднения

Использование метода статистического усреднения для оценки КАМ-256 не обеспечивает приемлемого уровня компенсации I/Q разбаланса при количестве отсчетов до 16000, в связи с чем выявлена необходимость использования другого способа оценки и компенсации амплитудно-фазового разбаланса для порядков модуляции КАМ-64 и выше.

Таблица 1 Значение среднеквадратической ошибки для моделирования алгоритма оценки и компенсации I/Q-разбаланса методом Монте-Карло при модуляции КАМ-64

Тип модуляции	QAM-64				
	n	512	2048	4096	8192
СКО _g , разы	0,066	0,026	0,013	0,01	0,01
СКО _{Δφ} , град	0,99	0,95	0,93	0,92	0,92
g, дБ	2				
Δφ, град	2				
E _b /N ₀	10 дБ				

При использовании метода статистического усреднения для оценки величины сдвига постоянной составляющей сигнала с модуляцией КАМ-64 требуется отношение сигнал/шум на бит на 4,5 дБ большее, чем для идеального случая при количестве отсчетов n=2048 (Таблица 2).

Таблица 2 Значение остаточной ошибки и СКО сдвига постоянной составляющей для моделирования алгоритма оценки и компенсации сдвига постоянной составляющей методом Монте-Карло при модуляции КАМ-64

Тип модуляции	QAM-64				
	n	512	2048	4096	8192
СКО, В	0.0269	0.0216	0.0193	0.0014	0.0022
DC, В	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
E _b /N ₀ , дБ	10 дБ				

Исследование скорости сходимости и количества отсчетов, необходимого для надежной компенсации I/Q-разбаланса и сдвига постоянной составляющей, при работе алгоритма линейной адаптивной фильтрации непосредственно по входному сигналу (без использования обучающей преамбулы) проводится с использованием следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} y(n) = x(n) + \vec{w}^T(n) \vec{x}^*(n) \\ \vec{w}(n+1) = \vec{w}(n) - M \vec{y}(n) \vec{y}(n) \end{cases} \quad (6)$$

Где $y(n)$ – сигнал на выходе адаптивного фильтра, $x(n)$ – входной сигнал, * означает комплексное сопряжение. $w(n)$ – коэффициент подстройки, M – размер шага адаптации весового коэффициента.

Объектами исследования являются сигналы КАМ-64...КАМ-256. В качестве опорного сигнала адаптивного фильтра используется сигнал, комплексно-сопряженный со входным. Для каждого типа исследуемого сигнала в диссертации проведена оценка скорости сходимости алгоритма (Рисунок 4). Как показал анализ, в случае канала с АБГШ для приемлемого уменьшения влияния I/Q-разбаланса на помехоустойчивость КАМ-64 достаточным будет значение в 5000 отсчетов, при котором остаточная ошибка не превышает значений $0,03+j0.004$. Для такой остаточной погрешности было проведено вычисление кривых помехоустойчивости с помощью MATLAB/Simulink, результаты которого представлены на Рисунке 4.

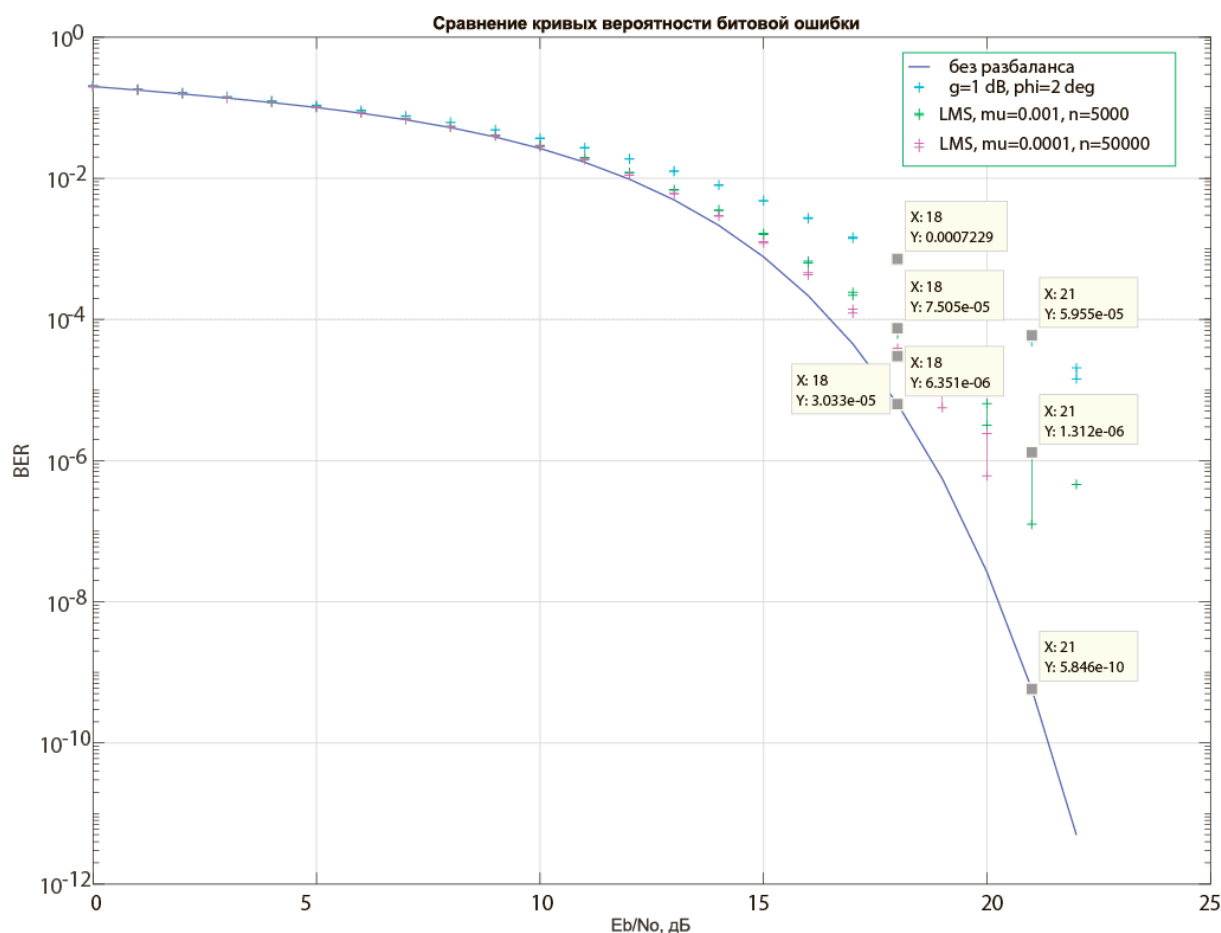


Рисунок 4 – Кривые BER для сигналов с модуляцией КАМ-64 с учетом фазового шума построенные после работы компенсационного алгоритма по методу линейной адаптивной фильтрации

При компенсации I/Q-разбаланса по входным данным для модуляции КАМ-64 применение метода LMS дает энергетический выигрыш в 3 дБ по сравнению с некомпенсированным

случае. Уменьшение шага адаптивной фильтрации μ на порядок дает несущественное изменение величины BER на $6.9 \cdot 10^{-5}$. Поэтому целесообразным является использование шага 0,001.

С учетом проведенного моделирования можно утверждать, что удовлетворительные результаты работы метода адаптивной фильтрации с адаптацией по методу наименьших квадратов непосредственно по входной последовательности без обучающей преамбулы достигнуты только для КАМ-64. При использовании обучающей последовательности результаты улучшаются, что позволяет рекомендовать их применение в системах с одной или несколькими пилотными несущими (например, OFDM). Также улучшения результатов можно добиться, если применить метод статистического усреднения в качестве грубой оценки, а метод адаптивной фильтрации использовать в качестве уточняющего для отслеживания изменения во времени величины разбаланса.

Исследования подразделов 3.1 и 3.2, показывают, что для оценки параметров амплитудно-фазового разбаланса при высоких порядках модуляции (КАМ-64,...,-256) существует необходимость в поиске более универсального метода компенсации. Это связано с тем, что при использовании адаптивной фильтрации требуется априорная информация о канале или использование обучающей последовательности. При быстро меняющихся параметрах канала использование перечисленных методов может быть недостаточно эффективным. Кроме того, многолучевость распространения может существенно ухудшать качество оценки канала даже при наличии обучающей последовательности.

Матричная форма принимаемого сигнала с учетом разбаланса и терминологии методов слепого разделения источников имеет вид:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} y_{\text{ФНЧ}} \\ x_{\text{QФНЧ}} \end{bmatrix}}_X = \underbrace{\begin{bmatrix} (1+g) \cos \Delta\varphi & (1+g) \sin \Delta\varphi \\ (1-g) \sin \Delta\varphi & (1-g) \cos \Delta\varphi \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} y_{\text{ФНЧ}} \\ x_{\text{QФНЧ}} \end{bmatrix}}_S \quad (7)$$

Задачей исследования является способ нахождения матрицы размешивания $W=A^{-1}$ (Рисунок 5). Поскольку однозначное определение матрицы A^{-1} не представляется возможным, но возможно обеспечение хорошей ее аппроксимации, то критерием сходимости будет максимальное приближение матрицы размешивания к единичной:

$$\mathbf{G} = \mathbf{A} * \mathbf{W} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Этот параметр является качественным показателем работы алгоритма по аналогии с установившимся значением среднеквадратической ошибки для адаптивных фильтров раздела 3.2. Восстановленные исходные сигналы будут определяться произведением матрицы наблюдений и размешивающей матрицы:

$$\mathbf{S} = \mathbf{W}\mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{X} \quad (9)$$

В качестве априорной информации принимается гипотеза о том, что исходные источники независимы. В случае Гауссовских наблюдаемых данных необходимым и достаточным условием независимости компонент является их некоррелированность. В таком случае будет достаточно применения метода анализа главных компонент (АГК). Поскольку в реальном мире данные могут иметь, к примеру, супергауссово распределение, то выполнение условия их некоррелированности может быть недостаточным для восстановления исходных данных. В таких случаях используется класс слепой обработки сигналов с использованием статистик более высоких порядков – коэффициента симметрии и коэффициента эксцесса. Такой класс алгоритмов слепой обработки сигналов называется классом анализа независимых компонент (АНК).

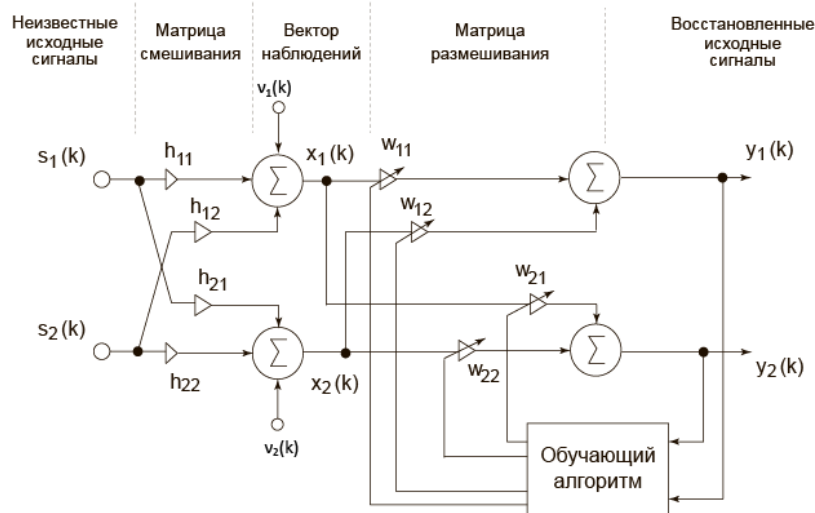


Рисунок 5 – Графическое представление применения метода слепого разделения источников для двух независимых источников

Меру гауссовости можно оценить, используя кумулянт четвертого порядка, называемый коэффициентом эксцесса:

$$\mu_4 = \bar{k}(x) = \frac{E\{x^4\}}{[E\{x^2\}]^2} - 3 = E\{x^4\} - 3 = \begin{bmatrix} -1.23 \\ -1.22 \end{bmatrix} \quad (10)$$

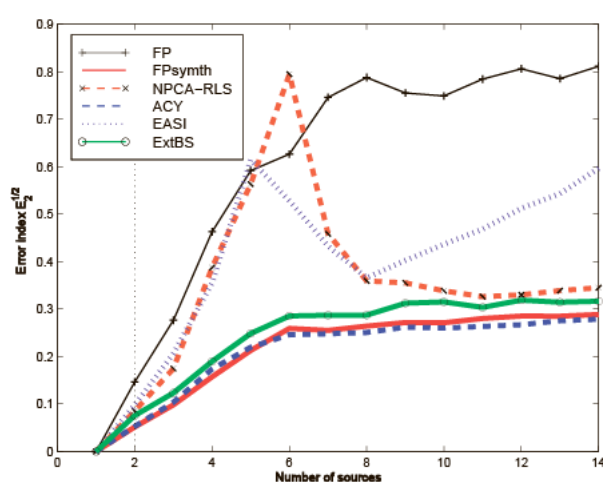
Отрицательный коэффициент эксцесса говорит о том, что распределение является более пологим, чем нормальное распределение. Кроме того, ненулевое значение этой величины говорит о возможности применения статистик более высокого порядка (АНК) для решения задачи компенсации разбаланса квадратурных составляющих.

В результате проведенного анализа количества ошибок при восстановлении данных (Рисунок 6а) и вычислительной сложности (Рисунок 6б), для поиска матрицы размешивания был выбран метод с фиксированным количеством итераций и симметричным извлечением данных (FPICA или FPsym), как наиболее удовлетворительное решение с точки зрения количества ошибок при извлечении двух источников и уровня вычислительной сложности. Эксперимент проводился для 100 реализаций, точность измерена с использованием индекса ошибок E1. Вычислительная сложность измерена в операциях с плавающей точкой, необходимых для обеспечения сходимости. При сравнении использованы следующие методы: FP – алгоритм АНК с фиксированным количеством итераций (FPICA); Fpsym – fpica с коэффициентом эксцесса в качестве меры негауссовости и симметричным извлечением; EASI – нелинейная декорреляция с тангенциальной нелинейностью. NPCA-RLS – метод наименьших квадратов для нелинейным АГК. В качестве нелинейности была использована функция $y-\tanh(y)$. BS – градиентный алгоритм Белла-Сежновски. ACY – алгоритм натурального градиента, предложенный Амари, Сичоки и Янгом. ExtBS – алгоритм максимального правдоподобия с натуральным градиентом. Алгоритм поиска матрицы размешивания с фиксированным количеством данных и симметричным извлечением имеет следующий порядок работы:

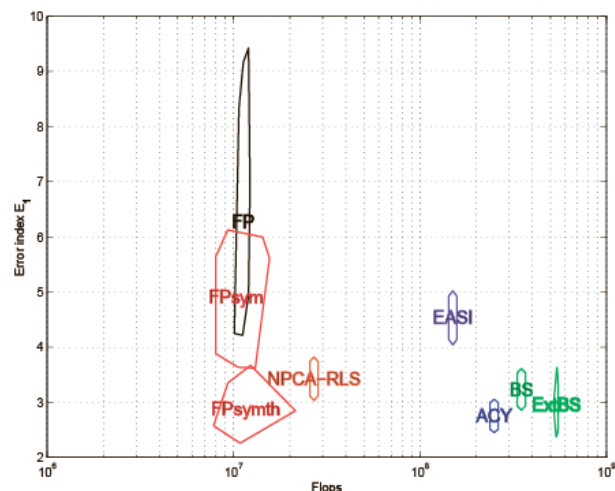
1. Центрирование;
2. Обеление;
3. Выбор количества оцениваемых компонент (2);
4. Выбор начальных значений для каждой i -ой из компонент w . Ортогонализация матрицы W как в шаге 6;
5. Для каждой i -ой компоненты $w : w \leftarrow E \{ z g(\mathbf{w}^T \mathbf{z}) \} - E \{ g'(\mathbf{w}^T \mathbf{z}) \} w$;
6. Симметричная ортогонализация матрицы $W = (\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_m)^T$ следующим способом:

$$W = (WW^T)^{-1/2} W = E \text{diag}(d_1^{-1/2}, \dots, d_m^{-1/2}) E^T;$$

7. При невыполнении условия сходимости, возвращаемся к шагу 5.



а)



б)

Рисунок 6 – а) Зависимость ошибок от количества извлекаемых источников. Выведены медианные значения при 50 реализациях; б) Зависимость между количеством ошибок и вычислительной сложностью

У этого метода есть несколько настраиваемых параметров, в частности параметр точности и тип нелинейности. Для подтверждения выбора как самого алгоритма FPICA, так и параметров его работы (типа нелинейности и точности) было проведено имитационное моделирование. Кроме того, было исследовано влияние шумов на точность восстановления и работу алгоритма для модуляции КАМ-64...256. В таблице 3 представлены результаты для сигнала с модуляцией КАМ-64.

Таблица 3. Результаты оценки алгоритма FPICA для КАМ-64. Параметры разбаланса: $g=2$ дБ, $\varphi=4^\circ$

Кол-во отсчетов	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000
Ев/Но, дБ	отсутствует	20	20	10	10	0	0
Количество итераций	11	11	11	12	11	11	13
Индекс независимости	0,064	0,0379	0,079	0,041	0,043	0,04	0,06
Индекс ортогональности	0,01	0,07	0,02	0,08	0,087	0,08	0,13
Тип нелинейности	cubic*	tan*	cubic	tan	cubic	tan	cubic
Оценка точности восстановления, дБ	31,61	19,36	20,13	10,85	10,65	4,09	4,09
Значение матрицы G	[1 0,01; 0,09 1]	[1 0,055; 0,055 1]	[1 0,067; 0,01 1]	[1 0,078; 0,003 1]	[1 0,001; 0,0087 1]	[1 0,432; 0,4507 1]	[1 0,23; 0,27 1]

* - тангенциальная нелинейность; ** - кубическая нелинейность

Алгоритм компенсации на основе метода анализа независимых компонент с фиксированным количеством операций (FPCA), полученный при исследованиях методов слепого разделения источников является наиболее универсальным способом решения задачи устранения амплитудно-фазового разбаланса квадратурных компонент. Он может быть использован для высоких порядков модуляции КАМ-64...КАМ-256.

В результате проведенных в диссертации исследований установлено, что нижней границей применения метода FPCA при работе в канале АБГШ является E_b/N_0 5 дБ для сигналов с КАМ-64, 10 дБ для сигналов с КАМ-128, КАМ-256. При меньших отношениях сигнал/шум наблюдается ухудшение точности восстановления данных и увеличение индекса ортогональности, что говорит о том, что процесс декорреляции выполняется недостаточно точно. Это утверждение справедливо при использовании и кубической и тангенциальной нелинейности.

В четвертом разделе проводится экспериментальное исследование разработанного алгоритма с использованием модельно-ориентированного проектирования.

Цель эксперимента – проверить работоспособность алгоритма и возможные изменения его характеристик при переводе алгоритма из кода с плавающей точкой в «фиксированную точку» для реализации на ПЛИС. Оценка эффективности реализованного на ПЛИС алгоритма.

Для быстрой разработки макета модема и проверки алгоритмов работы системы связи удобно использовать модельно-ориентированное проектирование. Основой построения модели, пригодной к генерации HDL-кода, является модель Simulink с внесенными в нее изменениями, обусловленными особенностями реализации. Во-первых, все процедуры обработки осуществляются не в формате с плавающей, а в формате с фиксированной точкой, и выполнены с помощью блоков, пригодных для генерации HDL-кода. Во-вторых, для реализации на ПЛИС введен блок первичной синхронизации, в котором осуществляется грубая оценка сдвига несущей частоты с точностью до 100 Гц и символьная синхронизация.

Кроме того, для реализации алгоритма на ПЛИС, числа из формата с плавающей точкой переведены в формат с фиксированной (Таблица 4).

Таблица 4 Разрядность слов, применяемая для реализации FPCA

Блок	Длина слова в битах	
	Целая часть	Дробная часть
Центрирование	8	8
Ковариация	8	8
Нахождение разложения матрицы	13	13
Обеление	13	13
Симметричная ортогонализация	13	13
Выполнение FPCA	13	13

Для визуальной оценки независимости сигналов, которая в данном случае будет заключаться в компенсации амплитудно-фазового разбаланса квадратурных сигналов, представлены графики созвездий до (Рисунок 7а) и после (Рисунок 7б) работы компенсатора. Их сравнение позволяет сделать вывод о том, что влияние разбаланса на принимаемый сигнал практически устранено.

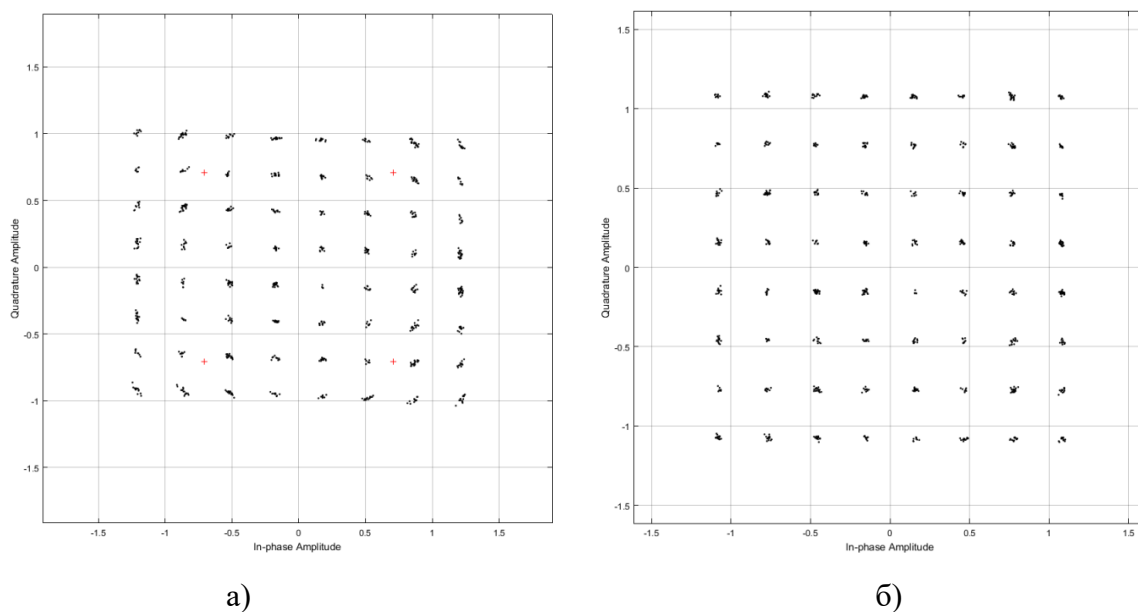


Рисунок 7 – Сигнальное созвездие до (а) и после (б) работы компенсатора с фиксированным количеством итераций

По сравнению с моделированием в MATLAB/Simulink модели, перевод в формат с фиксированной точкой и реализация алгоритма FPICA, привели к необходимости увеличения отношения сигнал/шум на 1 дБ при низких отношениях сигнал/шум и 0,5 дБ при отношении сигнал/шум более 10 дБ (Рисунок 8).

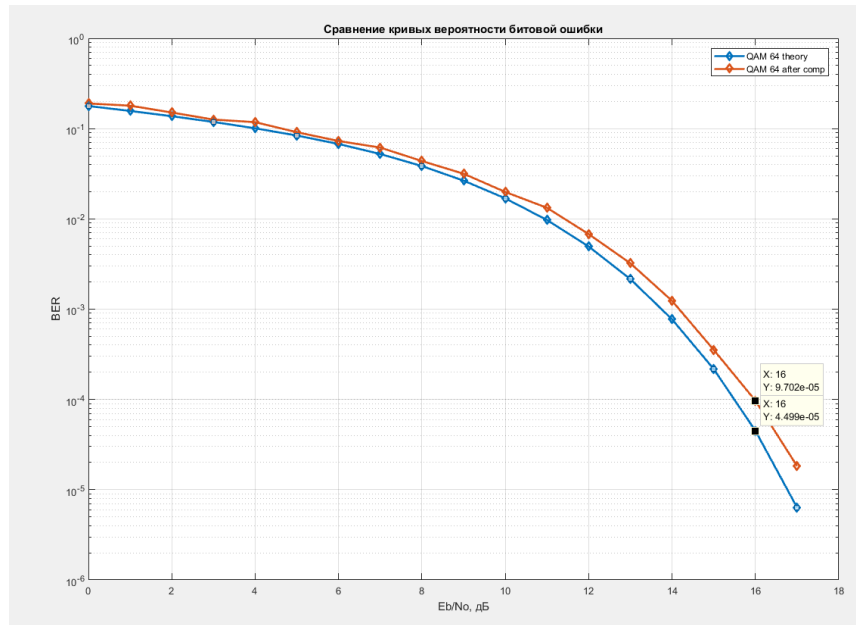


Рисунок 8 – Вероятность битовой ошибки после работы ФРІСА компенсатора, реализованного на ПЛІС

В **заключении** сформулированы основные результаты работы, сделаны выводы по работе в целом.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация посвящена анализу и разработке методов компенсации погрешностей квадратного преобразования в цифровых радиоприемниках с нулевой промежуточной частотой.

Основные результаты, полученные в диссертационной работе:

1. При рассмотрении влияния I/Q-разбаланса на качество приема сигнала с разными типами модуляции, установлено более выраженное влияние амплитудного разбаланса на величину BER, чем фазового. Однако на практике из-за наличия фазового разбаланса возможен случай некорректной работы системы восстановления амплитуды и фазы принимаемого сигнала, зависящей от величины фазового сдвига, что приведет к неточности восстановления несущей в системах с многопозиционной фазовой модуляцией. В системах с OFDM, фазовый разбаланс требует обязательной компенсации, поскольку из-за его воздействия нарушается ортогональность поднесущих.
2. Применение сверточного кодирования снижает влияние I/Q-разбаланса на величину BER. Однако даже с его использованием величина BER при наличии I/Q-разбаланса ухудшается в 3 раза для модуляции КАМ-16, в 4,5 раза для модуляции КАМ-64. Для КАМ-128 и КАМ-256 это различие составляет 6 и 7 раз соответственно.
3. Наличие амплитудного разбаланса влияет на величину избирательности приемника по соседнему каналу. Проведенные в диссертационной работе эксперименты показывают, что диа-

пазон ухудшения показателя BER при амплитудном разбалансе в 1 дБ и наличии помех от соседних каналов, которые в отсутствие разбаланса не влияют на качество приема, может составлять от одного (КАМ-16) до 5 (КАМ-256) порядков. Такая деградация свидетельствует об уменьшении уровня подавления помехи соседнего канала.

4. Удовлетворительные результаты работы метода адаптивной фильтрации с адаптацией по методу наименьших квадратов по информационному сигналу без использования тренировочной последовательности достигнуты только для низких порядков модуляции (до КАМ-64). При использовании обучающей последовательности результаты улучшаются, что позволяет применять их в системах с несколькими несущими (OFDM). Улучшения результатов можно также добиться, если применить метод статистического усреднения в качестве грубой оценки, а метод адаптивной фильтрации использовать в качестве уточняющего для отслеживания изменения величины разбаланса.

5. Алгоритм компенсации на основе метода анализа независимых компонент с фиксированным количеством итераций (FPICA), найденный при исследованиях методов слепого разделения источников, является наиболее универсальным способом решения задачи устранения амплитудно-фазового разбаланса квадратурных компонент. Он может быть использован для высоких порядков модуляции КАМ-64...КАМ-256. Применение метода FPICA к решению задачи компенсации разбаланса квадратурных составляющих рассмотрено впервые.

6. Нижней границей применения метода FPICA при работе в канале АБГШ является E_b/N_0 5 дБ для сигналов с КАМ-64, 10 дБ для сигналов с КАМ-128, КАМ-256. При меньших отношениях сигнал/шум наблюдается ухудшение точности восстановления данных и увеличение индекса ортогональности, что говорит о том, что процесс декорреляции выполняется недостаточно точно. Это утверждение справедливо при использовании и кубической и тангенциальной нелинейности.

7. Практическая реализация предложенного алгоритма FPICA подтверждает правильность теоретических выводов и работоспособность алгоритмов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных изданиях, входящих в перечень ВАК

1. Косичкина, Т. П. Анализ влияния характеристик квадратурных преобразователей на работу радиоприемных устройств цифровых сигналов радиосвязи и телерадиовещания / Т. П. Косичкина, **Е. Р. Хасьянова** // Т-Comm – Телекоммуникации и транспорт. – 2013. – № 9. – С. 100-103.
2. Пестряков, А. В. Упрощенные алгоритмы компенсации искажений КАМ-сигнала, наблюдаемого на фоне аддитивного шума / А. В. Пестряков, Н. Е. Поборчая, **Е. Р. Хасьянова** // Электросвязь. – 2016. – № 4. – С.35-40.
3. Поборчая, Н. Е. Оценка и компенсация искажений сигнала в канале с доплеровским расширением спектра и релеевскими замираниями / Н. Е. Поборчая, **Е. Р. Хасьянова** // Электросвязь. — 2017. — № 6. — С. 44-49.
4. Khasianova, E.R. The modern state analysis of digital signal processing applying due to the quadrature downconversion inaccurates compensation at the zero-if receivers / E. R. Khasianova // T-Comm-Telecommunications and their Application in Transport Industry, 2017. – Vol. 11. – № 11. – P. 84-88.
5. Khasianova, E.R. Investigation of analog downconversion imperfections degree of influence on the reception quality of the zero-if receivers / E. R. Khasianova // T-Comm- Telecommunications and their Application in Transport Industry. – 2018. — Vol. 12. – № 3. – P. 82-88.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах данных (SCOPUS, Web Of Science)

6. Khasianova, E. R. Experimental investigation of quadrature downconversion impairments estimation and compensation methods to the M-QAM signals / **E. R. Khasianova**, M. O. Sedov // SYNCHROINFO 2017 – Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. – Kazan, 2017. – P. 381-383.
7. Priputin, V. S. Fixed-Point ICA Compensator of I/Q Imbalance in Direct-Conversion Receivers / V. S. Priputin, **E. R. Khasianova** // SYNCHROINFO – 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. – Minsk, 2017. – P. 528-532.

Публикации в материалах международных конференций

8. Пестряков, А. В. Обзор методов компенсации разбаланса квадратурных составляющих в приемниках с цифровой обработкой сигналов /А. В. Пестряков, **Е. Р. Хасьянова** // СИНХРОИНФО 2012 – материалы международного научно-технического семинара «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях». – М.: Инсвязьиздат, 2012. – Том 1. – С. 99-100.
9. Косичкина, Т. П. Анализ влияния характеристик квадратурных преобразователей на работу радиоприемных устройств цифровых сигналов стандартов DVB-T2, DVB-S2 / Т. П. Косичкина, **Е. Р. Хасьянова** // 7-ая Отраслевая научная конференция “Технологии информационного общества”. Программа научно-технических секций. – М.: “ИД Медиа Паблшер”, 2013 г. – с. 87.
10. Пестряков, А. В. Применение метода градиентного поиска для оценки и компенсации сдвига постоянной составляющей при приеме сигналов с М-КАМ модуляцией / А. В. Пестряков, **Е. Р. Хасьянова** // КрыМиКо-2016 – материалы 24-й международной Крымской конфе-

ренции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, 2016. – Том 1. – С. 53-57.

11. Пестряков, А.В. Оценка влияния сдвига несущей частоты на эффективность алгоритма компенсации погрешностей квадратурного преобразования / А. В. Пестряков, Н. Е. Поборчая, **Е. Р. Хасьянова** // КрыМиКо-2016 – материалы 26-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, 2016. — Том 5. — С. 413-417.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

12. Дингес, С. И. Программа векторного анализа сигналов «Вектор-VSA» / С. И. Дингес, А. В. Пестряков, **Е. Р. Хасьянова** // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2018666781 от 20 декабря 2018 г.

Публикации в других изданиях

13. Отчет по НИР «Исследование и разработка программных и аппаратных продуктов для радиотехнических, телекоммуникационных и образовательных приложений» (заключительный): МТУСИ; рук. Пестряков А. В.; исполн. Хасьянова Е. Р. [и др.]. – М., 2018. – 150 с. (авторский вклад – 27 с.)