

На правах рукописи



ГЕРАСИМЕНКО ЕВГЕНИЙ СЕРГЕЕВИЧ

**БЫСТРЫЕ ЦИФРОВЫЕ АЛГОРИТМЫ КОГЕРЕНТНОЙ
ДЕМОДУЛЯЦИИ СИГНАЛОВ С АМПЛИТУДНОЙ
И ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ**

Специальность 2. 2.13 — Радиотехника, в том числе системы и устройства
телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Воронеж – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном казенном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации».

Научный руководитель:	Шерстюков Сергей Анатольевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры инфокоммуникационных систем и технологий Воронежского института МВД России
Официальные оппоненты:	Башкиров Алексей Викторович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры Воронежского государственного технического университета; Храмов Константин Константинович, кандидат технических наук, доцент, декан факультета информационных технологий и радиоэлектроники Муромского института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
Ведущая организация:	Акционерное общество «Воронежский научно-исследовательский институт «Вега»

Защита состоится 05 октября 2022 г. в 16.00 на заседании диссертационного совета 24.2.281.01, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», по адресу: г. Владимир, пр. Строителей, д. 3/7, корпус 3 ВлГУ, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ВлГУ по адресу г. Владимир, ул. Горького, 87, корпус 1 ВлГУ и на сайте <http://diss.vlsu.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, ВлГУ, РТиРС, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.281.01. Тел. (4922) 534-238, e-mail: ags@vlsu.ru.

Автореферат разослан 20 июля 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.281.01
доктор технических наук, профессор



А.Г. Самойлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В радиотехнических системах передачи дискретной информации по проводным и радиоканалам применяются различные сигналы с фазовой модуляцией (ФМ) и манипуляцией (ФМн), относительной фазовой манипуляцией (ОФМ), амплитудной модуляцией (АМ), а также квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ). Широкое распространение получили двоичные и многопозиционные (многократные) сигналы, например, двоичные ФМн и четырехпозиционные сигналы, в том числе со сдвигом фазы на $\pi/4$. С точки зрения помехоустойчивости оптимальной является когерентная демодуляция сигналов, однако при этом необходима полная (фазовая) синхронизация опорного генератора демодулятора с принимаемым сигналом. Применение относительной фазовой манипуляции (ОФМ) и некогерентной демодуляции с квадратурной обработкой сигнала упрощает систему синхронизации приемника, но приводит к существенной потере помехоустойчивости.

В современных системах передачи дискретной информации широко используется цифровая обработка сигналов (ЦОС). Принимаемый случайный процесс квантуется по уровню и времени аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Полученные отсчеты смеси сигнала и помех в моменты квантования передаются в вычислительное устройство для формирования результата обработки, например, принимаемого информационного символа.

Известные оптимальные алгоритмы ЦОС требуют значительных вычислительных мощностей и часто труднореализуемы в реальном времени. Наилучшие результаты обеспечивают быстрые алгоритмы ЦОС, однако они ориентированы прежде всего на спектральный анализ сигнала (алгоритмы быстрого преобразования Фурье – БПФ) и быструю свертку принимаемого и опорного сигналов, а их применение затруднительно при потоковой обработке отсчетов высокочастотных радиосигналов. Хорошие результаты обеспечивает быстрый цифровой алгоритм некогерентной цифровой обработки сигналов с относительной фазовой манипуляцией в демодуляторе.

Объектом исследования являются алгоритмы когерентной ЦОС сигналов с ФМн, ОФМ, АМ и КАМ и соответствующие им устройства демодуляции.

Предметом исследования являются процесс формирования результатов цифровой когерентной обработки радиосигналов, свойства и характеристики

алгоритмов и устройств их демодуляции.

Степень разработанности проблемы. Вопросы демодуляции сигналов в своих трудах описывали отечественные и зарубежные ученые, такие как А.В. Агеев, Д.А. Багдасарян, А.Н. Глушков, Д.Ю. Панкратов, Н.Т. Петрович, Э.Д. Витерби, Р. Блейхуд, В.В. Шахгильдян и др.

В известных источниках в не достаточной мере описаны предложения по реализации быстрых цифровых алгоритмов и соответствующих им устройств когерентной демодуляции сигналов с ФМн, ОФМ, АМ и КАМ, и их разработка является актуальной.

Цель и задачи исследования. Цель диссертационной работы заключается в разработке быстрых цифровых алгоритмов и соответствующих им устройств когерентной демодуляции высокочастотных радиосигналов с ФМн, ОФМ, АМ и КАМ, требующих выполнения минимального числа простых арифметических операций, обладающих высокой вычислительной эффективностью и допускающих практическую реализацию на современной элементной базе.

Для достижения поставленной цели решаются следующие научные задачи:

- 1) разработка и исследование быстрых цифровых алгоритмов когерентной демодуляции сигналов с фазовой, относительной фазовой, амплитудной и квадратурной амплитудной манипуляциями, а также их аппаратная реализация;
- 2) исследование возможности упрощения реализации квадратурных каналов;
- 3) исследование алгоритмов сравнения фаз в демодуляторах с двоичной и четырехпозиционной ОФМ;
- 4) разработка и исследование моделей узкополосного радиотракта;
- 5) исследование помехоустойчивости и статистическое имитационное моделирование предлагаемых быстрых цифровых алгоритмов когерентной демодуляции.

Научная новизна полученных в ходе исследования результатов заключается в следующем.

1. На единообразной основе предложены быстрые цифровые алгоритмы когерентной демодуляции сигналов с двоичной фазовой и относительной фазовой манипуляцией, с четырехпозиционной фазовой и относительной

фазовой манипуляцией, многопозиционной амплитудной манипуляцией и квадратурной амплитудной модуляцией, требующие выполнения минимального числа простых арифметических операций.

2. На базе предложенных быстрых алгоритмов цифровой обработки сигнала разработаны структурные схемы цифровых когерентных демодуляторов. Показано, что они обладают высокой собственной частотной избирательностью и обеспечивают оптимальное накопление отсчетов на интервале длительности информационного символа.

3. Предложена цифровая модель узкополосного радиотракта на базе рекурсивного цифрового фильтра, согласованная с предлагаемыми алгоритмами обработки радиосигналов. Исследовано влияние узкополосности радиотракта на форму демодулируемых сигналов и их межсимвольную интерференцию. Даны рекомендации по выбору параметров радиотракта.

4. Проведено исследование помехоустойчивости предлагаемых демодуляторов при воздействии шумовых помех. Показано, что они обеспечивают потенциальную помехоустойчивость при минимальных вычислительных или аппаратных затратах. Наблюдается нормализация помех с различными статистическими свойствами, что расширяет возможности использования полученных выражений для вычисления вероятностей ошибок.

5. Разработаны программы статистического имитационного моделирования предлагаемых демодуляторов. Полученные результаты хорошо согласуются с расчетами помехоустойчивости. Исследовано влияние узкополосности радиотракта на вероятности ошибок, показано, что избыточное уменьшение полосы пропускания приводит к значительному ухудшению помехоустойчивости. Рассмотрено влияние смещения фаз принимаемого и опорного сигналов. Показано, что при демодуляции простых двоичных сигналов требования к точности фазовой синхронизации совпадают с известными результатами для оптимальных демодуляторов. При обработке многопозиционных сигналов требования к их синфазности с опорным сигналом повышаются или требуется увеличение рабочего отношения сигнал/шум.

6. Рассмотрен пример аппаратной реализации демодулятора четырехпозиционных ФМ сигналов на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). Показано, что для решения поставленной задачи на несущих частотах до $10 \div 20$ МГц достаточно сравнительно простой и недорогой ПЛИС семейства Spartan-6.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты диссертационного исследования могут быть использованы при проектировании и разработке аппаратуры связи. Использование предлагаемых алгоритмов дает возможность построения эффективных цифровых когерентных демодуляторов, обеспечивающих цифровую обработку высокочастотных радиосигналов при минимальных требованиях к вычислительной мощности. Практическая значимость работы подтверждается зарегистрированными в федеральной службе по интеллектуальной собственности патентами на изобретение (№ 2633183 от 11.10.2017, № 2748858 от 01.06.2021) и программами для ЭВМ (№ 2017615092 от 03.05.2017; № 2017615256 от 12.05.2017; № 2017615365 от 15.05.2017; № 2017660249 от 20.09.2017).

Методология и методы исследования. Теория вероятностей, статистическая радиотехника, теория принятия решений, программирование и статистическое имитационное моделирование.

Положения, выносимые на защиту:

1. Быстрые цифровые алгоритмы когерентной демодуляции сигналов с двоичной и четырехпозиционной ФМн и ОФМ, многопозиционной АМ и КАМ, отличающиеся минимальным числом арифметических операций на период, что позволяет уменьшить вычислительные затраты в $\eta = \frac{4N}{\log_2 N + 1}$, например для сигнала с $N=16$ периодов в 12,8 раза.

2. Быстрый цифровой алгоритм когерентной квадратурной обработки сигналов, отличающийся формированием по четыре отсчета АЦП на период сигнала, что упрощает реализацию квадратурных каналов.

3. Быстрые цифровые алгоритмы сравнения фаз соседних символов сигналов с двоичной и четырехпозиционной ОФМ, отличающиеся простотой и быстродействием реализации.

4. Цифровая модель узкополосного радиотракта на базе рекурсивного цифрового фильтра, работающая с предлагаемыми алгоритмами обработки радиосигналов.

5. Методика расчета помехоустойчивости и результаты статистического имитационного моделирования быстрых цифровых алгоритмов когерентной демодуляции радиосигналов, отличающаяся учетом специфики предлагаемых быстрых цифровых алгоритмов когерентной демодуляции, подтверждающая их оптимальность и согласующаяся с классической теорией потенциальной

помехоустойчивости.

Достоверность результатов подтверждается использованием известных математических методов и результатами имитационного моделирования, подтвержденными свидетельствами о государственной регистрации 4-х программ для ЭВМ, двумя зарегистрированными патентами на изобретение, а также внедрением результатов работы в образовательную и практическую деятельность.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: Международная научно-практическая конференция «Охрана, безопасность, связь» (г. Воронеж, 2014, 2015, 2016, 2017, 2019, 2020 гг.); Международная научно-техническая конференция «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях СИНХРОИНФО 2014» (г. Воронеж, 2014 г.); Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные вопросы эксплуатации систем охраны и защищенных телекоммуникационных систем» (г. Воронеж, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019 гг.); Международная научно-практическая конференция «Общественная безопасность, законность и правопорядок в III тысячелетии» (г. Воронеж, 2014, 2015, 2016, 2017 гг.).

Публикации. По материалам диссертации опубликована 31 научная работа (1 статья в журнале, индексируемом в международных базах, 11 статей в журналах перечня ВАК, 13 материалов научных конференций, 4 вычислительных программных средства, зарегистрированных в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, 2 патента на изобретение, зарегистрированные в Федеральной службе по интеллектуальной собственности), в том числе 15 работ опубликовано без соавторов.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты исследования внедрены в производственную деятельность ООО «Сайком», ООО «НПП ТЕТА», ООО «БГ-Оптикс», в образовательный процесс ФГБОУ ВО «Воронежский институт МВД России» и ФГБОУ ВО «Дальневосточный юридический институт МВД России»,

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует п. 5 паспорта специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения, так как в работе произведены разработка и исследование цифровых алгоритмов обработки сигналов и информации в радиотехнических устройствах и системах различного назначения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 107 наименований и одного приложения. Работа изложена на 183 страницах машинописного текста (основной текст занимает 155 страниц, содержит 114 рисунков и 9 таблиц).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цель и частные задачи, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, выносимых на защиту.

В главе 1 проведен анализ радиосигналов с ФМ, ОФМ, АМ и КАМ, рассмотрены их свойства и методы демодуляции. Рассмотрены модели канала связи и приемного радиотракта, предложена цифровая модель узкополосного радиотракта, ориентированная на исследование свойств рассматриваемых алгоритмов демодуляции. Рассмотрены методы синхронизации демодуляторов, сформулированы требования к погрешностям оценки фазы принимаемого сигнала. Проведен анализ известных цифровых алгоритмов и устройств когерентной обработки радиосигналов.

В результате анализа определены подходы к разработке быстрых цифровых алгоритмов когерентной демодуляции сигналов с ФМ, ОФМ, АМ и КАМ.

В главе 2 предложены алгоритмы и соответствующие им устройства когерентной демодуляции двоичных и четырехпозиционных сигналов с ФМ и ОФМ. Рассмотрены алгоритмы демодуляции сигналов с многопозиционной АМ и КАМ, вопросы реализации рассматриваемых алгоритмов.

Получены структурные схемы алгоритмов когерентной демодуляции, обладающие собственной частотной селективностью и формирующие оптимальные отклики при воздействии аддитивной смеси сигнала и шума.

Предложено использовать базовый быстрый цифровой алгоритм обработки узкополосных сигналов для когерентной демодуляции ФМ сигналов. Предложена процедура квантования для когерентной демодуляции двоичных и многопозиционных сигналов с фазовой, амплитудной и квадратурной амплитудной модуляцией. Исследованы частотные характеристики базового алгоритма, показано, что он обладает хорошими частотно-селективными свойствами. Определены статистические свойства сигнальной и шумовой компонент на выходе базового алгоритма. Разработаны алгоритмы и

соответствующее устройства когерентной цифровой демодуляции сигналов с двоичной ФМ и ОФМ, четырехпозиционной ФМ и ОФМ. Разработан алгоритм когерентной демодуляции сигнала с многопозиционной АМ и сигналов с КАМ.

Произведено моделирование всех выше перечисленных устройств. Результаты моделирования свидетельствуют о высокой эффективности рассмотренных алгоритмов с точки зрения формы отклика демодулятора, поступающего в решающее устройство. Рассмотрены возможности программной и аппаратной реализации предложенных быстрых цифровых алгоритмов демодуляции сигналов. Показано, что наилучшие результаты будут получены при аппаратной реализации на базе современных ПЛИС.

Принцип действия предложенных алгоритмов можно рассмотреть на примере алгоритма быстрой цифровой демодуляции двоичных ФМн сигналов.

Базовый быстрый цифровой алгоритм когерентной демодуляции ФМ сигналов позволяет реализовать алгоритм быстрой цифровой демодуляции двоичных фазоманипулированных сигналов, структурная схема которого показана на рис. 1.

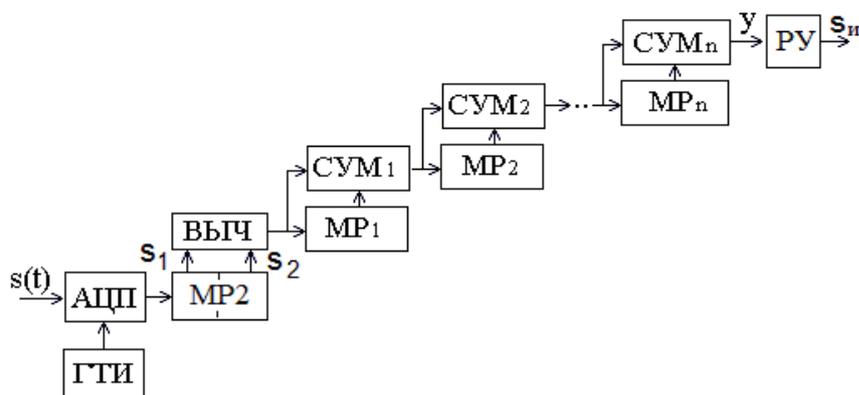


Рис. 1. Структурная схема алгоритма быстрой цифровой демодуляции двоичных ФМн сигналов

Входной двоичный ФМ сигнал с двумя значениями начальной фазы $\psi = 0$ и $\psi = \pi$ квантуется по времени и уровню АЦП, который синхронно с входным сигналом формирует по два отсчета s_1 и s_2 на период. Эти отсчеты на каждом периоде запоминаются в многоразрядном регистре сдвига на два отсчета (MP2).

В базовом алгоритме за $N = 2^n$ периодов на выходе демодулятора накапливается величина y_i ,

$$y_i = \sum_{k=0}^{N-1} (s_{1(i-k)} - s_{2(i-k)}), \quad (1)$$

в моменты окончания символов достигающая максимума, при отсутствии шума равного

$$y = \begin{cases} 2NS & \text{при } \psi = 0, \\ -2NS & \text{при } \psi = \pi. \end{cases} \quad (2)$$

Эти значения y сравниваются с нулем в решающем устройстве (РУ), которое формирует принятые информационные символы s_H : если $y > 0$, то принят сигнал с начальной фазой $\psi = 0$, а иначе $\psi = \pi$.

Модулированный двоичный ФМн сигнал имеет вид

$$s(t) = S \cdot \cos \left[2\pi f_0 t + \pi \cdot \frac{1 - x_{\lfloor t/NT_0 \rfloor}}{2} \right], \quad (3)$$

где $\lfloor t/NT_0 \rfloor$ – целая часть числа, равная номеру информационного символа x_k со значениями ± 1 (k – номер символа). Начальная фаза ФМ сигнала принимает значения 0 или π , первой соответствует значение $y/2N = 1$, а второй $y/2N = -1$.

На рис. 3 приведен полученный в результате статистического имитационного моделирования график зависимости отклика демодулятора от номера текущего периода при наличии шумов при указанных параметрах, там же пунктиром обозначена временная диаграмма модулирующего сигнала.

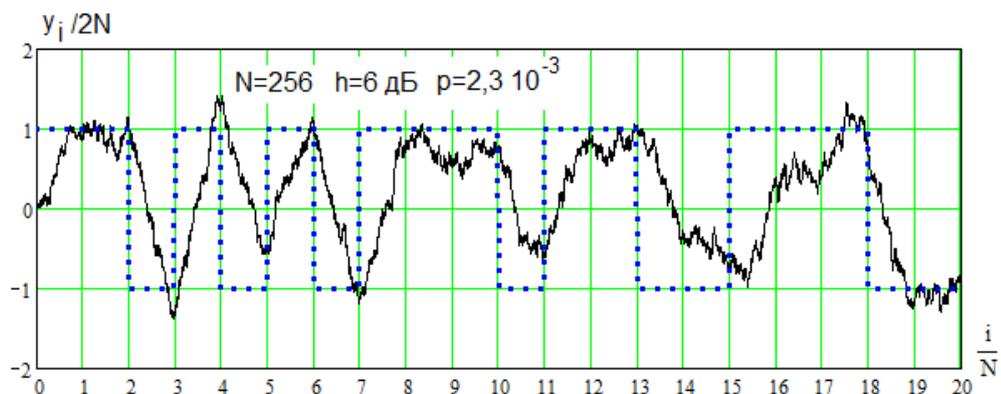


Рис. 3. График зависимости отклика демодулятора от номера текущего периода при наличии шумов

Как видно, шумовая помеха приводит к искажению демодулированного сигнала и появлению ошибочных решений (в примере вероятность ошибки $p = 2,3 \cdot 10^{-3}$), сигнальная и шумовая компоненты сглажены, что обусловлено фильтрующими свойствами демодулятора. Алгоритм демодуляции обеспечивает эффективное выделение информационного сигнала при небольшом отношении сигнал/шум h .

На основании базового алгоритма разработаны цифровые алгоритмы демодуляции четырехпозиционных ФМн сигналов, двоичных сигналов с ОФМ, сигналов с четырехпозиционной ОФМ, многопозиционной АМ, квадратурной амплитудной манипуляцией.

В главе 3 проведен анализ помехоустойчивости рассмотренных алгоритмов когерентной демодуляции. Получены выражения для вероятности ошибки при воздействии гаусовского шума, проведен их анализ. Показано, что рассматриваемые алгоритмы демодуляции обеспечивают минимальные вероятности ошибок, то есть обладают потенциальной помехоустойчивостью.

Рассмотрено влияние параметров узкополосного приемного тракта на форму откликов демодулятора и его помехоустойчивость. Показано, что для предлагаемых алгоритмов демодуляции ослабляются требования к частотной селективности приемного радиотракта.

Определена вероятность ошибки демодулятора двоичных ФМн сигналов, показано, что предложенный демодулятор обладает потенциальной (предельно достижимой) помехоустойчивостью.

Рассмотрена помехоустойчивость демодулятора четырехпозиционных ФМ сигналов, показано, что предлагаемый алгоритм демодуляции является оптимальным. Проведена оценка помехоустойчивости когерентной демодуляции двоичных сигналов с ОФМн, доказано, что предлагаемый цифровой алгоритм демодуляции оказывается оптимальным. Определена вероятность ошибки цифровой демодуляции сигналов с четырехпозиционной ОФМ, показана высокая эффективность демодулятора при отсутствии явления «обратной работы». Получена оценка помехоустойчивости когерентной демодуляции сигнала с многопозиционной АМ. Показано, что при одинаковых энергетических затратах на двоичный информационный элемент многопозиционные сигналы с АМ при когерентной обработке обеспечивают достаточно высокую помехоустойчивость. Исследована помехоустойчивость цифрового демодулятора сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией. Получено выражение для вероятности ошибки, показана высокая информационная эффективность работы цифрового демодулятора сигналов с КАМ. Рассмотрено влияние узкополосного приемного тракта на форму отклика демодулятора. Показано, что благодаря собственной частотной селективности демодулятора целесообразно выбирать полосу пропускания тракта больше ширины спектра сигнала.

Исследование помехоустойчивости можно рассмотреть на примере демодулятора двоичных ФМ сигналов.

Отклик демодулятора двоичных ФМ сигналов имеет вид

$$y_i = \sum_{k=0}^{N-1} (s_{1(i-k)} - s_{2(i-k)}), \quad (4)$$

имеет нормальную плотность вероятностей

$$w(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(y - y_{CP})^2}{2\sigma^2}\right] \quad (5)$$

со средними значениями $y_{CP} = 2NS$ при $\psi = 0$ или $y_{CP} = -2NS$ при $\psi = \pi$ и одинаковыми дисперсиями $\sigma^2 = 2N\sigma_{III}^2$. Соответствующие графики показаны на рис. 4, зачерненные области в окрестности $y = 0$ соответствуют ошибочным решениям о принятом символе.

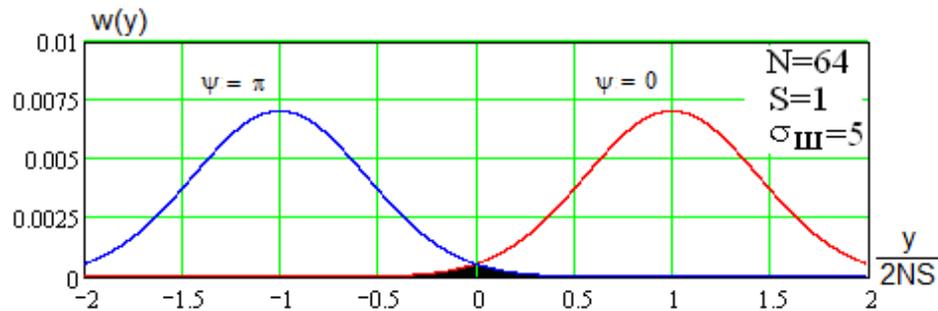


Рис. 4. Графики плотности вероятностей откликов при $\psi = 0$ и $\psi = \pi$

Решение о принятом символе в решающем устройстве принимается при сравнении величины y с нулем, тогда вероятность ошибки равна

$$p_{ош} = 1 - \int_{-\infty}^0 w(z) dz = 1 - \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(z + 2NS)^2}{2\sigma^2}\right] dz. \quad (6)$$

Проводя замену переменной

$$t = \frac{y + 2NS}{\sigma}, \quad (7)$$

получим

$$p_{ош} = 1 - \int_{-\infty}^{\frac{2NS}{\sigma}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{t^2}{2}\right] dt. \quad (8)$$

Интеграл в правой части (8) называют функцией (интегралом) Лапласа

$$F(h) = \int_{-\infty}^h \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{t^2}{2}\right] dt, \quad (9)$$

тогда получим

$$p_{ош} = 1 - F\left(\frac{2NS}{\sigma}\right). \quad (10)$$

Отношение сигнал/шум равно

$$h = \sqrt{N} \frac{S}{\sigma_{ш}} = \sqrt{2} \frac{NS}{\sigma}, \quad (11)$$

тогда для вероятности ошибки можно записать известное классическое выражение

$$p_{ош} = 1 - F(\sqrt{2}h). \quad (12)$$

Зависимость $p_{ош}$ от отношения сигнал/шум h в дБ показана на рис. 5

Таким образом, предлагаемый быстрый цифровой алгоритм демодуляции сигналов с двоичной фазовой манипуляцией обеспечивает потенциальную помехоустойчивость в белом шуме, то есть является оптимальным.

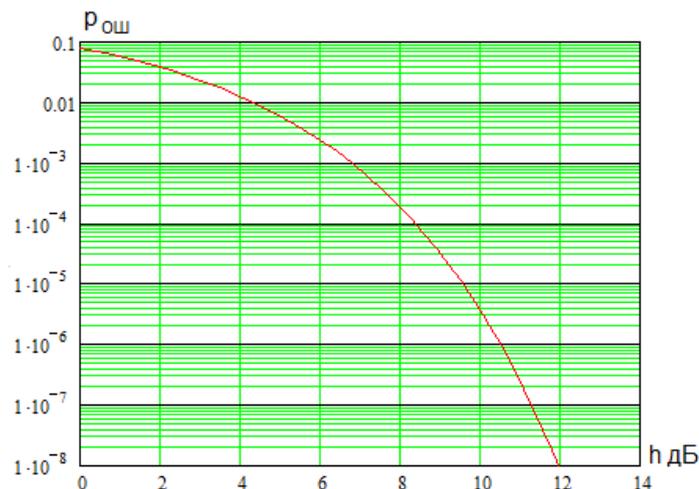


Рис. 5. Зависимость $p_{ош}$ от отношения сигнал/шум h

В главе 4 проведены вычислительные эксперименты и имитационное моделирование рассмотренных алгоритмов когерентной демодуляции сигналов с ФМ, ОФМ, АМ и КАМ в программах, разработанных в рамках диссертационного исследования. Полученные результаты свидетельствуют об их высокой (потенциальной) помехоустойчивости и вычислительной эффективности. Результаты моделирования хорошо согласуются с теоретическими расчетами вероятностей ошибок. Проведено исследование влияния на работу демодуляторов узкополосного радиотракта. Зависимость вероятности ошибки от полосы пропускания радиотракта представлена на рис. 5.

Рассмотрены вопросы реализации предлагаемых алгоритмов демодуляции. Показано, что наилучшие результаты обеспечиваются на базе

современных ПЛИС.

Исследование свойств демодулятора при моделировании можно рассмотреть на примере демодулятора двоичных ФМн сигналов.

Программа статистического имитационного моделирования когерентного демодулятора сигналов с двоичной фазовой манипуляцией разработана в среде Delphi, ее рабочее окно показано на рис. 6. В верхней его части расположены поля редактирования несущей частоты (по умолчанию $f_0 = 10 \text{ МГц}$), объема выборки символов $L = 1000000$, числа $N = 64$ периодов $T_0 = 1/f_0$ в информационном символе и значения отношения сигнал/шум $h \text{ дБ}$ (начальное, конечное и шаг изменения).

В левой части рабочего окна расположен выпадающий список выбора цифровой модели узкополосного приемного тракта при $N_M = 0$ (тракт отсутствует) и $N_M = 16, 32, 64$, а также поле ввода значения отклонения фазы $\Delta\varphi$ опорного генератора от состояния идеальной синхронизации (по умолчанию $\Delta\varphi = 0$). Ниже расположена таблица вывода результатов моделирования с теоретическим и экспериментальным значениями вероятности ошибки. В графической области показана теоретическая (сплошная линия) и полученная в результате статистического имитационного моделирования (отмечена точками) зависимость вероятности ошибки от отношения сигнал/шум $h \text{ дБ}$.

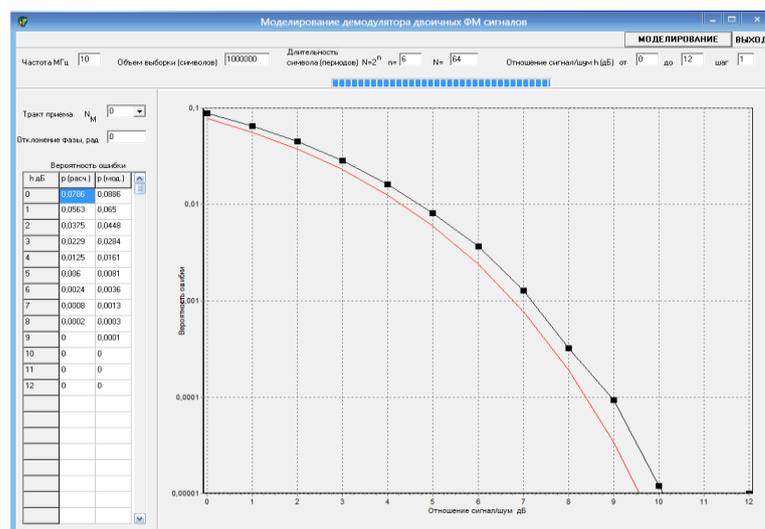


Рис. 6. Программа статистического имитационного моделирования когерентного демодулятора сигналов с двоичной фазовой манипуляцией

Снижение полосы пропускания приемного тракта (при изменении N_M от 0 до $N/4 = 16$) не приводит к заметному изменению вероятности ошибки, хотя

при этом шум становится узкополосным и его мощность уменьшается в несколько раз, а в более узкополосном тракте (при $N_M = N/2 = 32$) помехоустойчивость значительно ухудшается за счет падения энергии элемента сигнала. Моделирование подтверждает выводы о влиянии узкополосности приемного тракта на помехоустойчивость демодулятора. Необходимость использования узкополосных приемных трактов при $N_M > N/4$ может возникнуть при наличии в них, например, узкополосных помех.

Пример зависимости вероятности ошибки $p_{ОШ}$ от полосы пропускания Π_T радиотракта в нормированном виде Π_T/Π показан на рис. 7 (величина полосы частот демодулятора Π равна).

$$\Pi = 2\Delta f = 2\frac{f_0}{N} \quad (13)$$

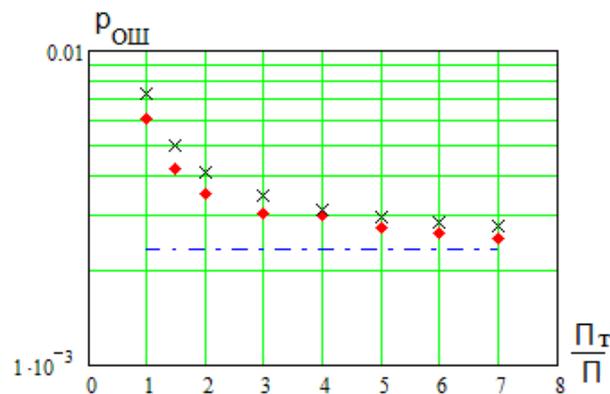


Рис. 7. Зависимость вероятности ошибки $p_{ОШ}$ от полосы пропускания Π_T радиотракта

Как видно, использование узкополосного тракта существенно увеличивает вероятность ошибки при $\Pi_T < (3 \div 5) \cdot \Pi$. Таким образом, по результатам моделирования с учетом (13) полосу пропускания радиотракта целесообразно выбирать из условия

$$\Pi_T = (6 \div 10) \cdot \frac{f_0}{N}. \quad (14)$$

На рис. 8а показана полученная в результате моделирования и отмеченная точками зависимость среднеквадратического (действующего) значения S_d элемента информационного сигнала с единичной амплитудой от нормированной полосы пропускания Π_T/Π . Штрихпунктирной линией отмечен уровень входного сигнала $S = 1/\sqrt{2} = 0.707$. Точками на рис. 8б представлена зависимость от Π_T/Π среднеквадратического значения шумовой помехи σ_{Π} на

выходе узкополосного приемного тракта.

Как видно из рис. 8а, при $P_T < (3 \div 5) \cdot \Pi$ происходит подавление боковых компонент спектра сигнала и его действующее значение S_d (мощность) уменьшается, что приводит к увеличению вероятности ошибки. Действующее значение σ_{Π} падает при уменьшении P_T / Π , как видно из рис. 8б. На рис. 7 крестиками отмечены результаты расчета вероятности ошибки для белого шума и значений действующего значения S_d сигнала в узкополосном тракте из рис. 8а.

Приведенные результаты моделирования свидетельствуют о том, что предлагаемый быстрый цифровой алгоритм когерентной демодуляции фазоманипулированных сигналов оптимально выделяет информационный сигнал из входного шума.

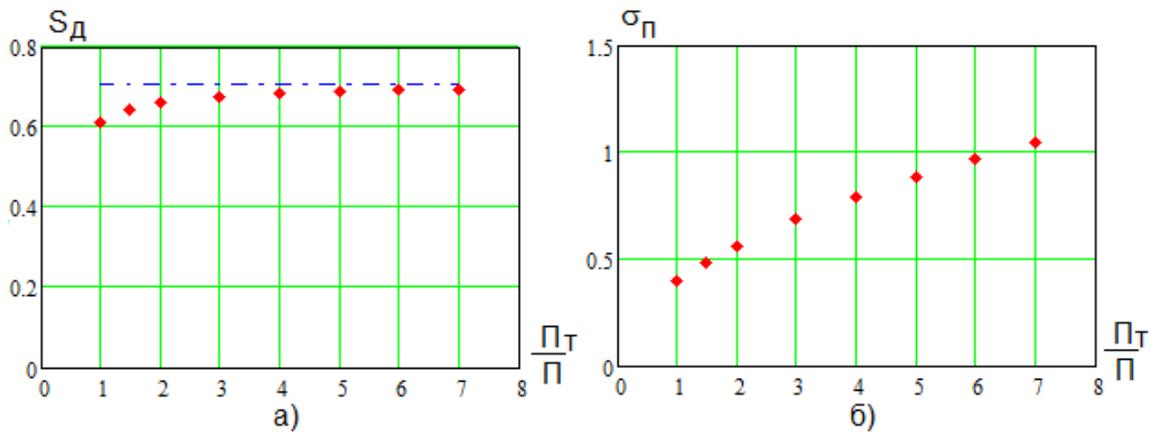


Рис. 8. Зависимость действующего значения S_d элемента сигнала (а) и среднеквадратического значения шумовой помехи σ_{Π} (б) на выходе радиотракта от его полосы пропускания P_T/Π

Рассматриваемая программа позволяет оценить влияние на вероятность ошибки детерминированного смещения $\Delta\varphi$ фазы опорного (тактового) сигнала (погрешности фазовой синхронизации).

Зависимости вероятности ошибки $P_{ош}$ от детерминированного смещения фазы $\Delta\varphi$ для различных значений отношения сигнал/шум h показаны на рис. 9, при отрицательных $\Delta\varphi$ наблюдаются те же значения $P_{ош}$.

Проведено статистическое имитационное моделирование модулированных сигналов с ФМ, ОФМ, АМ и КАМ. Рассмотрено влияние узкополосного радиотракта на их форму. Сформулированы требования к параметрам радиотракта.

Исследованы свойства аддитивных помех при прохождении через предлагаемые алгоритмы демодуляции сигнала, показано, что наблюдается нормализация шумовой помехи с достаточно произвольными вероятностными характеристиками, что позволяет использовать для расчета помехоустойчивости предложенные соотношения, полученные для гауссовского шума.

Рабочее окно программы с временными диаграммами для ФМн сигнала представлены на рис. 10. На рис. 11 представлено созвездие для сигнала с двоичной ФМн.

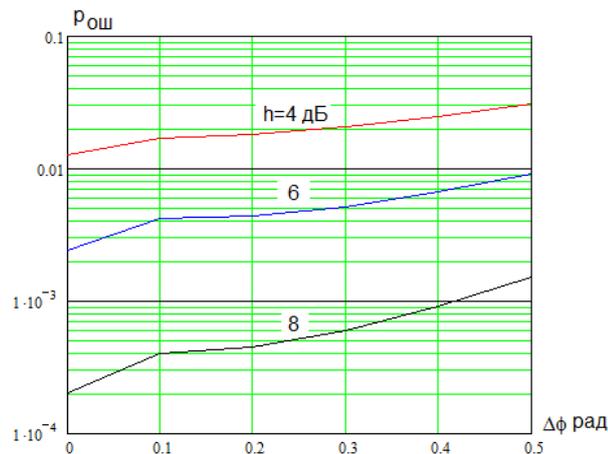


Рис. 9. Зависимости вероятности ошибки $p_{ош}$ от детерминированного смещения фазы $\Delta\phi$ для различных значений отношения сигнал/шум

Проведено статистическое имитационное моделирование предложенных цифровых когерентных демодуляторов сигналов с ФМ, ОФМ, АМ и КАМ с аддитивными шумовыми помехами. Показано, что они обеспечивают потенциальную помехоустойчивость (минимально возможную вероятность ошибки).

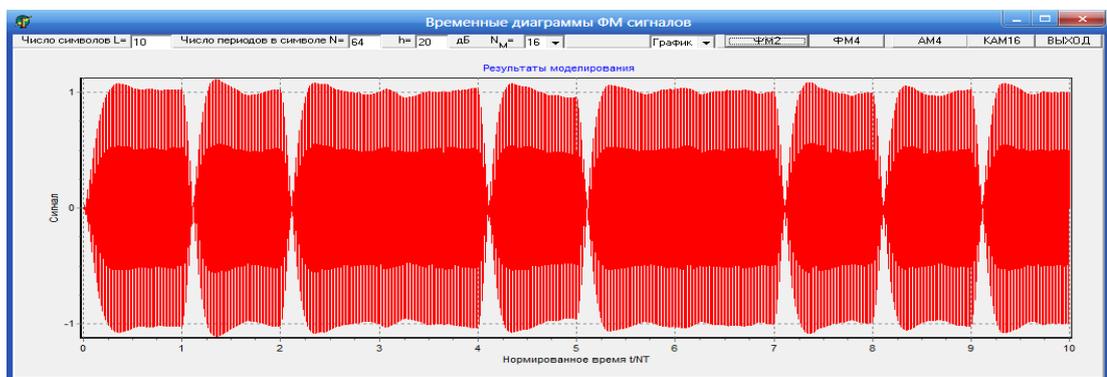


Рис. 10. Временная диаграмма ФМн сигнала на выходе узкополосного радиотракта с $N_M = 16$

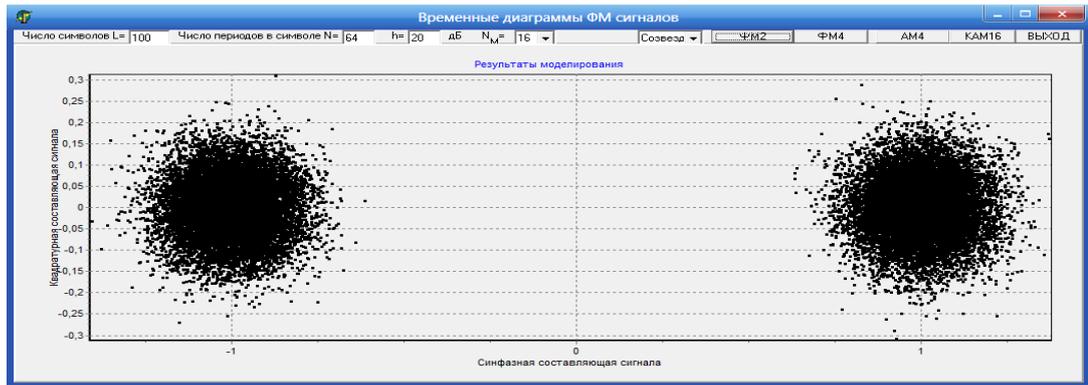


Рис. 11. Созвездие ФМн сигнала

Исследовано влияние узкополосного радиотракта на характеристики помехоустойчивости демодуляторов. Показано, что благодаря собственной частотной селективности они наилучшим образом обрабатывают принимаемый сигнал, а существенное уменьшение полосы пропускания тракта приема уменьшает энергию принимаемых радиоимпульсов и повышает их межсимвольную интерференцию, что повышает вероятность ошибочной демодуляции.

Рассмотрено влияние узкополосности радиотракта на вероятность ошибки при различных видах модуляции. Наилучшие результаты обеспечивает двоичная ФМ. С ростом числа позиций сигналов с АМ, ФМ и КАМ влияние радиотракта на помехоустойчивость усиливается.

Проведен анализ влияния на помехоустойчивость смещения фазы тактового генератора относительно принимаемого сигнала. Показано, что для двоичной ФМ нарушение фазовой синхронизации демодулятора ухудшает помехоустойчивость в соответствии с известными результатами. Чувствительность демодулятора к отклонению фазы тактового сигнала значительно повышается с ростом числа позиций сигнала, что приводит к повышению требований к точности фазовой синхронизации.

Рассмотрена возможность аппаратной реализации демодулятора сигналов с четырехпозиционной ФМ на основе ПЛИС как устройства средней сложности с двумя квадратурными каналами. Показано, что достаточно использовать сравнительно простую и дешевую ПЛИС, что обусловлено простотой и математической эффективностью предложенных быстрых цифровых алгоритмов демодуляции.

На рис. 12 представлены результаты размещения элементов демодулятора на кристалле ПЛИС. Как видно, используется большая часть возможностей

кристалла. При использовании более мощной и дорогой ПЛИС семейства Virtex 5 (например, модели XC5VLX110T-1FF1136) окажутся использованными примерно 5-6% ее возможностей.

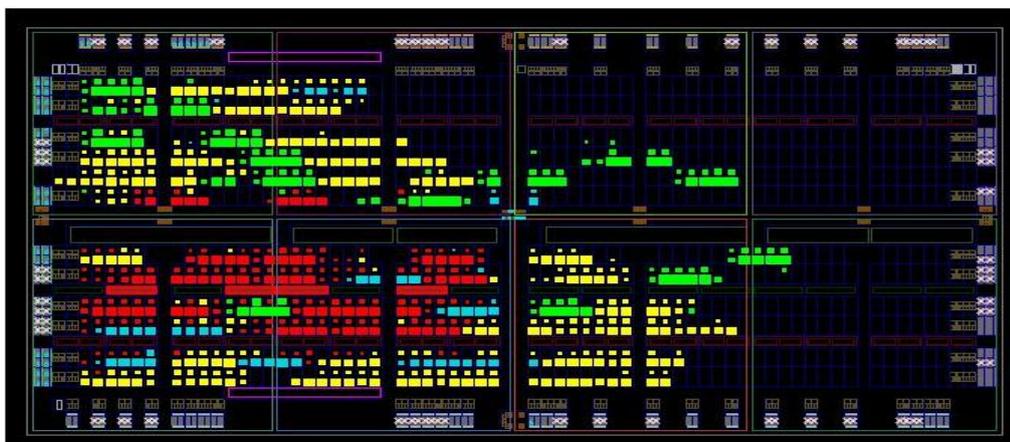


Рис. 12. Результаты размещения элементов демодулятора на кристалле ПЛИС

Заключение. Разработаны быстрые цифровые алгоритмы когерентной демодуляции сигналов с двоичной и четырехпозиционной ФМн и ОФМ, многопозиционной АМ и КАМ, отличающиеся выполнением минимального количества простых арифметических операций и позволяющие уменьшить вычислительные затраты.

Разработан алгоритм формирования квадратурных каналов и сравнения фаз соседних символов, согласующийся с работой быстрых алгоритмов демодуляции.

Разработана цифровая модель узкополосного радиотракта на базе рекурсивного цифрового фильтра, работающая с предлагаемыми алгоритмами обработки радиосигналов.

Предложены методика расчета помехоустойчивости и результаты статистического имитационного моделирования быстрых цифровых алгоритмов когерентной демодуляции радиосигналов, отличающиеся учетом специфики предлагаемых быстрых цифровых алгоритмов когерентной демодуляции, подтверждающая их оптимальность и согласующиеся с классической теорией потенциальной помехоустойчивости.

Заключение содержит основные результаты и выводы.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и

образования Российской Федерации:

1. Герасименко Е. С. Синтез устройства обработки частотно-манипулированных радиосигналов на фоне помех и анализ его характеристик / С. Н. Ляшенко, А. Н. Глушков, Е. С. Герасименко // Вестник Воронежского института МВД России – 2016. – №1 – С. 7–16.

2. Герасименко Е. С. Алгоритм цифровой когерентной демодуляции фазоманипулированных сигналов и его характеристики // Е.С. Герасименко // Вестник Воронежского института МВД России. – 2017. – №1. – С.137–143.

3. Герасименко Е. С. Алгоритм цифровой когерентной демодуляции двоичных сигналов с ОФМ и его помехоустойчивость / А. Н. Глушков, Е. С. Герасименко // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2017. – №5. – Т.13. – С. 70-74.

4. Герасименко Е. С. Алгоритм цифровой когерентной демодуляции четырех-позиционных фазоманипулированных сигналов / А. Н. Глушков, Е. С. Герасименко // Телекоммуникации. – Наука и технологии. – 2017. – № 10. – С. 12–17.

5. Герасименко Е. С. Алгоритм цифровой когерентной демодуляции сигнала с КАМ и его характеристики / Е. С. Герасименко, А. Н. Глушков, В. М. Черненький // Электромагнитные волны и электронные системы. – М. – 2017. – №8. – С. 68 – 73.

6. Герасименко Е. С. Алгоритм цифровой когерентной демодуляции сигнала с многопозиционной амплитудной манипуляцией и его характеристики // Е. С. Герасименко // Вестник Воронежского института МВД России. – 2017. – № 3. – С.94–103.

7. Герасименко Е.С. Исследование характеристик цифрового алгоритма когерентной демодуляции сигнала с квадратурной амплитудной манипуляцией / Е.С. Герасименко, Д.А. Сошнева, С.Н. Волкова, С.А. Бабкин // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2018. Т. 9. № 2. С. 44–49.

8. Герасименко Е.С. Исследование цифровой модели узкополосного радиотракта / Е.С. Герасименко // Вестник Воронежского института МВД России. 2018. № 1. С. 86–93.

9. Герасименко Е.С. Исследование принципа работы алгоритма цифровой демодуляции сигналов с четырехкратной фазовой манипуляцией / Е.С. Герасименко, Э.В. Спешилов, А.В. Оболонская // Вестник Воронежского института МВД России. 2019. № 2. С. 172–180.

10. Герасименко Е.С. Анализ способов демодуляции фазоманипулированных радиосигналов / С.А. Шерстюков, Е.С. Герасименко // Вестник Воронежского института МВД России. 2021. № 4. С. 141–150.

11. Герасименко Е.С. Анализ методики расчета потенциальной помехоустойчивости цифровых демодуляторов при работе с шумовыми помехами / Е.С. Герасименко, С.А. Шерстюков // «Радиотехнические и телекоммуникационные системы» 2022 №2. С. 49 – 57.

Публикации в изданиях, индексируемых Scopus:

12. Study of characteristics of digital algorithm of coherent demodulation of signal with quadrature amplitude shift keying/Gerasimenko, E. S., Volkova, S. N., Soshneva, D. A., Babkin, S. A., Varlamov, O. V./ 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2018. – Minsk, 2018. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8456976

Патенты на изобретение РФ:

13. Патент № 2633183 Российская Федерация. Цифровой когерентный демодулятор сигналов с двоичной фазовой манипуляцией \\ Герасименко Е.С., Глушков А.Н., Калинин М.Ю; № 2016140002 заявл. 11.10.2016: опубл. 11.10.2017. Правообладатели: Герасименко Е.С., Глушков А.Н., Калинин М.Ю.

14. Патент № 27488858 Российская Федерация. Цифровой когерентный демодулятор сигналов с двоичной относительной фазовой манипуляцией // Чернояров О.В., Макаров А.А., Глушков А.Н., Литвиненко В.П., Литвиненко Ю.В., Герасименко Е.С. 2020133307 заявл. 09.10.2020: опубл. 01.06.2021. Правообладатель: ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

Регистрация программ для ЭВМ:

15. Герасименко Е. С. «Программа моделирования устройства демодуляции четырехпозиционных амплитудно-манипулированных сигналов» : программа для ЭВМ / Е. С. Герасименко // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Свидетельство № 2017615256; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 12.05.2017.

16. Герасименко Е. С. «Программа моделирования устройства демодуляции четырехпозиционных фазоманипулированных сигналов» : программа для ЭВМ /

Е. С. Герасименко // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Свидетельство № 2017615365; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 15.05.2017.

17. Герасименко Е. С. «Программа моделирования устройства демодуляции двухпозиционных фазоманипулированных сигналов»: программа для ЭВМ / Е. С. Герасименко // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Свидетельство № 2017615092; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 03.05.2017.

18. Герасименко Е. С. «Программа моделирования устройства демодуляции сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией»: программа для ЭВМ / Е. С. Герасименко // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Свидетельство № 2017660249; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 21.06.2017.

В других изданиях:

19. Герасименко Е. С. Цифровой демодулятор сигналов с относительной фазовой манипуляцией / А.Н. Глушков, Е.С. Герасименко, А.В. Сидоров // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2014. – Т. – 5. – № 4. – С. 123–126.

20. Герасименко Е. С. Организация сети цифровой радиосвязи с удаленными районами // Актуальные вопросы эксплуатации систем охраны и защищенных телекоммуникационных систем // Е.С. Герасименко // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. – 2014. С. 49–51.

21. Герасименко Е. С. Методы обработки сигналов в цифровых системах радиосвязи / Е. С. Герасименко, А. Н. Глушков // Охрана, безопасность, связь. – 2013. – Материалы международной научно-практической конференции. – 2014. С. 123–125.

22. Герасименко Е. С. Методы демодуляции частотно-манипулированных сигналов // Е.С. Герасименко // Общественная безопасность, законность и правопорядок в III тысячелетии. 2015. – № 1-3. – С. 39–42.

23. Герасименко Е. С. Способы и алгоритмы демодуляции частотно-манипулированных сигналов // Е.С. Герасименко // Технические и социально-экономические науки в высшей школе России и азиатско-тихоокеанском регионе: прошлое, настоящее и перспективы развития. – сборник научных

материалов международной (очно-заочной) научно-практической конференции 2015. – Ч.3. – С. – 26–29.

24. Герасименко Е. С. Цифровой алгоритм обработки сигналов с двоичной фазовой манипуляцией // Е.С. Герасименко // Общественная безопасность, законность и правопорядок в III тысячелетии. 2016. – № 1-2. – С. 137-140.

25. Герасименко Е. С. Способы обработки частотно-манипулированных радиосигналов на фоне помех // Е.С. Герасименко // Охрана, безопасность, связь. 2016. – № 1–1. – С. 139–142.

26. Герасименко Е. С. Вопросы демодуляции двоичных фазоманипулированных сигналов // Е.С. Герасименко // Охрана, безопасность, связь. 2017. – № 1–1. – С. 247–249.

27. Герасименко Е. С. Алгоритм демодуляции радиосигналов с многопозиционной амплитудной манипуляцией // Е.С. Герасименко // Актуальные вопросы эксплуатации систем охраны и защищенных телекоммуникационных систем. – Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. –2017. – С. 49–50.

28. Герасименко Е. С. Алгоритм цифровой демодуляции четырехпозиционных ФМ сигналов // Е.С. Герасименко // Общественная безопасность, законность и правопорядок в III тысячелетии. 2017. – № 3-2. – С. 119–125.

29. Герасименко Е.С. Исследование помехоустойчивости демодулятора четырехпозиционных ФМ сигналов // Е.С. Герасименко // Охрана, безопасность, связь. 2018. Т. 1. № 3 (3). С. 28–31.

30. Герасименко Е.С. Исследование устройства демодуляции фазоманипулированных сигналов / Е.С. Герасименко // Охрана, безопасность, связь. 2019. Т. 1. № 4 (4). С. 33–37.

31. Герасименко Е.С. Алгоритм демодуляции двоичных сигналов с относительной фазовой манипуляцией / Е.С. Герасименко, С.А. Шерстюков // XIV Всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб. тез. докл. Всероссийской научной конференции. Муром, 4 февр. 2022 г.– Муром: МИ ВлГУ, С. 85–88.

Герасименко Евгений Сергеевич

**Быстрые цифровые алгоритмы когерентной демодуляции
сигналов с амплитудной и фазовой манипуляцией**

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 15 июля 2022 г.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л 1,0. Тираж 100. Заказ _____

Издательство Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
600000, Владимир, ул. Горького, 87.