



УТВЕРЖДАЮ

Начальник Воронежского института
МВД России

генерал-майор полиции

А.П. Нахимов

« 27 » 05 20 22 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**федерального государственного казённого образовательного учреждения
высшего образования**

**«Воронежский институт Министерства внутренних дел
Российской Федерации»**

Диссертация «Быстрые цифровые алгоритмы когерентной демодуляции радиосигналов с амплитудной и фазовой манипуляцией» выполнена на кафедрах инфокоммуникационных систем и технологий, математики и моделирования систем федерального государственного казенного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации».

В 2014 г. Герасименко Е.С. окончил Воронежский институт МВД России по специальности «Защищенные системы связи», в 2017 г. окончил магистратуру Московской академии экономики и права по специальности «Юриспруденция».

В период подготовки диссертации соискатель Герасименко Евгений Сергеевич являлся адъюнктом очной формы обучения и преподавателем ФГКОУ ВО «Воронежский институт МВД России».

Справка об обучении в адъюнктуре выдана в 2018 г. федеральным государственным казенным образовательным учреждением высшего образования «Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации».

Научный руководитель – Шерстюков Сергей Анатольевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры инфокоммуникационных систем и технологий федерального государственного казенного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации».

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

1. Цель и актуальность работы

В радиотехнических системах передачи дискретной информации по проводным и радиоканалам применяются различные сигналы с фазовой модуляцией (ФМ, Phase Modulation - PM) и манипуляцией (ФМн, Phase Shift Keying - PSK), относительной фазовой манипуляцией (ОФМн), амплитудной модуляцией (АМн), а также квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ, Quadrature Amplitude Modulation - QAM). Широкое распространение получили двоичные и многопозиционные (многократные) сигналы,

например, двоичные ФМн (BPSK) и четырехпозиционные (QPSK) сигналы, в том числе со сдвигом фазы на $\pi/4$ (QPSK). 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 (ОФМн) 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.

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

Цель работы заключается в разработке быстрых цифровых алгоритмов и реализующих их устройств когерентной демодуляции различных высокочастотных радиосигналов с ФМн, ОФМн, АМн и КАМ, требующих выполнения минимального числа простых арифметических операций, обладающих высокой вычислительной эффективностью и допускающих практическую реализацию на современной элементной базе. Тема диссертационного исследования утверждена ученым советом института, протокол №5 от 14 декабря 2021 г.

2. Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в разработке алгоритмов работы устройств демодуляции сигналов, расчете и оценке помехоустойчивости устройств, работающих на базе предлагаемых алгоритмов, создании программ статистического, имитационного моделирования демодулятора с фазовой, четырехпозиционной фазовой, амплитудной и квадратурной амплитудной манипуляцией, которые в установленном порядке зарегистрированы в федеральной службе по интеллектуальной собственности. Разработан и описан принцип работы устройства демодуляции фазоманипулированных сигналов, работающего на базе предлагаемого в диссертации алгоритма

обработки сигнала, получено 2 патента на изобретение РФ. Подготовлены и опубликованы статьи в журналах, входящих в перечень ВАК.

3. Степень достоверности результатов проведенных исследований подтверждается использованием известных математических методов и результатами статистического имитационного моделирования, а так же регистрацией в установленном порядке 2-х патентов на изобретение Российской Федерации и 4-х программ для ЭВМ.

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 частотой 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 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÷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 (№2748858 от 09 октября 2020 г.; №2633183 от 11.10.2017 г.) и программами для ЭВМ (№2017615092 от 03.05.2017 г.; №2017615256 от 12.05.2017 г.; №2017615365 от 15.05.2017 г.; №2017660249 от 21.06.2017 г.).

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 10-20 МГц достаточно сравнительно простой и недорогой ПЛИС семейства Spartan-6.

6. Ценность научных работ соискателя заключается:

в разработке единого принципа формирования устройств демодуляции сигналов с фазовой, амплитудной и квадратурной амплитудной манипуляцией;

в разработке программ статистического имитационного моделирования демодулятора сигналов, которые позволяют производить оценку работы устройства на базе предлагаемых алгоритмов.

7. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем.

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 31 научной работе, из них работ, индексируемых в международных базах данных – 1, опубликованных в рецензируемых научных журналах (из перечня ВАК) - 11; патентов на изобретение РФ - 2; свидетельств на программы для ЭВМ - 4.

Основные научные результаты диссертации достаточно полно отражены:

В изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки 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 // 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 // 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. 121-126.

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

Патенты на изобретение *РФ*:

13. Цифровой когерентный демодулятор сигналов с двоичной фазовой манипуляцией // Герасименко Е.С., Глушков А.Н., Калинин М.Ю. Патент на изобретение 2633183 от 11.10.2017 г.

14. 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. Патент на изобретение 2748858 от 01.06.2021 г.

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 г.

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 г.

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 г.

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 г.

В других изданиях:

19. Герасименко Е. С. Цифровой демодулятор сигналов с относительной фазовой манипуляцией / Глушков А.Н., Герасименко Е.С., Сидоров А.В. // 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 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 // 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 // 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 // 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 // Охрана, безопасность, связь. 2016. – № 1-1. – С. 139-142.

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

27. Герасименко Е. С. Алгоритм демодуляции радиосигналов с многопозиционной амплитудной манипуляцией // 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 // 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.

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, 2018 (г. Воронеж, 2014 г., г. Минск 2018 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.).

8. Научная специальность, которой соответствует диссертация.

Диссертационная работа Герасименко Евгения Сергеевича «Быстрые цифровые алгоритмы когерентной демодуляции радиосигналов с амплитудной и фазовой манипуляцией» соответствует паспорту научной специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения. Направлением исследования паспорта специальности, в частности пункту 5 «Разработка и исследование алгоритмов, включая цифровые, обработки сигналов и информации в радиотехнических устройствах и системах различного назначения, в том числе синтез и оптимизация алгоритмов обработки».

9. Выводы:

Диссертация «Быстрые цифровые алгоритмы когерентной демодуляции радиосигналов с амплитудной и фазовой манипуляцией» оформлена в соответствии с пунктом 30 Положения о совете по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук и с ГОСТ Р 7.0.11-2011.

Диссертация соответствует требованиям, предъявляемым Положением о присуждении учёных степеней к кандидатским диссертациям, в том числе п. 9, является научно-квалификационной работой, в которой предложено новое устройство демодуляции радиосигналов, работающее на базе нового алгоритма обработки сигналов.

Диссертация «Быстрые цифровые алгоритмы когерентной демодуляции радиосигналов с амплитудной и фазовой манипуляцией» Герасименко Евгения Сергеевича рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата наук по специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Присутствовали на расширенном заседании кафедры инфокоммуникационных систем и технологий 26 человек, в том числе 6 докторов наук, кандидатов наук 12:

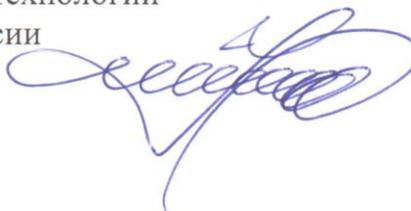
заместитель начальника института по научной работе к.ю.н., полковник полиции Д.А. Симоненко;

начальник кафедры инфокоммуникационных систем и технологий к.т.н., доцент полковник полиции С.С. Никулин;

заместитель начальника кафедры инфокоммуникационных систем и технологий д.т.н., доцент О.В. Пьянков,
профессор кафедры инфокоммуникационных систем и технологий д.т.н., профессор Н.С. Хохлов;
профессор кафедры инфокоммуникационных систем и технологий д.т.н., доцент полковник полиции А.И. Климов;
профессор кафедры инфокоммуникационных систем и технологий д.т.н., доцент полковник полиции С.А. Шерстюков;
доцент кафедры инфокоммуникационных систем и технологий к.т.н. подполковник полиции С.В. Канавин;
старший преподаватель кафедры инфокоммуникационных систем и технологий к.т.н. подполковник полиции А.С. Лукьянов;
преподаватель кафедры инфокоммуникационных систем и технологий старший лейтенант полиции И.В. Гилев;
начальник кабинета специальных дисциплин кафедры инфокоммуникационных систем и технологий старший лейтенант полиции А.А. Терентьев;
техник кафедры инфокоммуникационных систем и технологий С.И. Плужникова;
начальник кафедры математики и моделирования систем полковник к.т.н., доцент, полковник полиции И.В. Щербакова;
профессор кафедры математики и моделирования систем д.ф-м.н., профессор полковник полиции В.В. Меньших;
профессор кафедры математики и моделирования систем д.ф-м.н., профессор В.А. Родин;
доцент кафедры математики и моделирования систем к.т.н., доцент полковник полиции С.В. Синегубов;
доцент кафедры математики и моделирования систем к.т.н., доцент полковник полиции А.Н. Копылов;
доцент кафедры математики и моделирования систем к.т.н. майор полиции А.В. Меньших;
доцент кафедры математики и моделирования систем к.п.н., доцент С.А. Телкова;
доцент кафедры математики и моделирования систем к.ф-м.н., доцент О.Ю. Данилова;
старший преподаватель к.т.н. майор полиции М.А. Панкова;
преподаватель кафедры математики и моделирования систем капитан полиции Е.С. Герасименко;
преподаватель кафедры к.т.н. старший лейтенант полиции Н.Е. Чиркова;
адъюнкт института старший лейтенант полиции С.Е. Кривобокова;
адъюнкт института лейтенант полиции В.О. Морозова;
адъюнкт института лейтенант полиции В.А. Никитенко;
адъюнкт института лейтенант полиции А.В. Попов.

Результаты голосования: «за» – 25 человек, «против» – 0 человек, «воздержались» – 0 человек, протокол № 15 от «26» мая 2022 г.

Председательствующий
на расширенном заседании кафедры
начальник кафедры
инфокоммуникационных систем и технологий
Воронежского института МВД России
кандидат технических наук, доцент
полковник полиции



С.С. Никулин

Подпись Никулина Сергея Сергеевича заверяю

Учёный секретарь
ученого совета Воронежского института
МВД России



О.В. Гороховцев