

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор

В.Д. Панков

2018 г.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА — Российский технологический университет» по диссертационной работе Унгера Антона Юрьевича на тему «Алгоритмы синхронизации при приеме сигналов с циклически изменяющимся индексом модуляции», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.04 Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

Диссертационная работа выполнена на кафедре радиоэлектронных систем и комплексов Института радиотехнических и телекоммуникационных систем Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА — Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА).

В 2009 году Унгер А.Ю. с отличием окончил Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет)» (МИРЭА), получив квалификацию инженера по специальности «Микроэлектроника и твердотельная электроника».

С 01.09.2009 по 28.08.2012 Унгер А.Ю. обучался в аспирантуре МИРЭА по специальности 05.12.04 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения». Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов №162 выдано в 28.08.2012 г. Федеральным государственным бюджетным

образовательным учреждением высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики».

Научный руководитель – д.т.н., профессор Куликов Геннадий Валентинович, профессор кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиотехнических и телекоммуникационных систем РТУ МИРЭА.

Работа обсуждалась на расширенном заседании кафедры радиоэлектронных систем и комплексов ИРТС РТУ МИРЭА. Присутствовали 13 человек.

Сотрудники кафедры радиоэлектронных систем и комплексов ИРТС РТУ МИРЭА: председатель, зав. кафедрой, д.т.н., доцент С.Н. Замуруев, д.т.н., проф. А.А. Парамонов, к.т.н., доцент В.О. Скрипачев, д.п.н., проф. Г.Н. Арсеньев, д.т.н., проф. Г.В. Куликов, ассистент А.А. Судаков, к.т.н., доцент А.П. Пирхавка, техник кафедры И.С. Потапов.

Сотрудники кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств ИРТС РТУ МИРЭА: зав. кафедрой, д.т.н., проф. С.У. Увайсов, к.т.н., доцент М.С. Костин.

Сотрудники кафедры телекоммуникационных систем ИРТС РТУ МИРЭА: зав. кафедрой, д.т.н., проф. В.И. Нефедов.

Сотрудники кафедры теоретической радиотехники и радиофизики ИРТС РТУ МИРЭА: зав. кафедрой, д.т.н., проф. В.К. Битюков.

Сотрудники кафедры радиосистем передачи информации ИРТС РТУ МИРЭА: к.т.н., доцент А.И. Стариковский.

В процессе обсуждения были заданы следующие вопросы:

Парамонов А.А.: Подходят ли представленные алгоритмы синхронизации для сигналов ЦИИМ с частичным откликом, сигналов с многопозиционной манипуляцией и сигналов с количеством индексов модуляции более 2-х?

Унгер А.Ю.: Да, при выводе алгоритмов синхронизации на основе уравнений оптимальной нелинейной фильтрации не делалось никаких

предположений о формате сигнала ЦИИМ, за исключением рационального индекса модуляции.

Стариковский А.И.: Каковы допустимые значения дисперсии задержки и фазы принимаемого сигнала, при которых система синхронизации остается работоспособной?

Унгер А.Ю.: Допустимые значения дисперсии задержки составляют  $10^{-2} T^2$ , фазы  $10^{-3}$  рад<sup>2</sup>.

Пирхавка А.П.: Современные системы передачи информации работают на скоростях передачи  $\sim 1$  Гбит/с. Представленный модем сигнала ЦИИМ работает при скорости передачи информационных символов 62,5 кбит/с. Какова максимальная для данного модема скорость передачи данных?

Унгер А.Ю.: Скорость передачи символов зависит от частоты тактового генератора, на которой может работать ПЛИС. Макет разрабатывался на ПЛИС Xilinx начального уровня, поэтому и такая низкая скорость передачи. Рассмотренные алгоритмы синхронизации допускают параллельную обработку сигнала, поэтому максимальная скорость передачи символов ограничена пропускной способностью используемого канала связи.

Скрипалев В.О.: Для чего в структурной схеме модема сигнала ЦИИМ присутствует два дополнительных демодулятора Витерби?

Унгер А.Ю.: Дополнительные демодуляторы Витерби необходимы для выбора максимальной метрики, соответствующей наиболее вероятному состоянию сигнала, опережающего и отстающего от принимаемого колебания. Таким образом в цифровом исполнении выполняется операция дифференцирования по задержке.

Арсеньев Г.Н.: Стандарт IRIG-106 регламентирует использование сигналов ЦИИМ. Какой сигнальный формат используется в стандарте?

Унгер А.Ю. Стандарт регламентирует использования сигнального формата ЦИИМ с двумя индексами модуляции (4/16;5/16) с частотным откликом в виде приподнятого косинуса ЗРС и 4-арным алфавитом.

## **1. Актуальность исследований**

Актуальность исследования определяется тем, что в диссертационной работе впервые на основе теории оптимальное нелинейной фильтрации синтезированы совместные алгоритмы тактовой, фазовой и цикловой синхронизации сигналов с циклически изменяющимся индексом модуляции. Сигналы ЦИИМ применяются в системах спутниковой связи и аэрокосмической телеметрии. Существующие в настоящее время разработки затрагивают вопросы оптимального приема таких сигналов в предположении идеальной тактовой и фазовой синхронизации. Алгоритмы синхронизации, разработанные к настоящему времени не способны обеспечить необходимого качества приема, что ограничивает использование сигналов ЦИИМ на практике.

Синтезированные в работе алгоритмы синхронизации позволяют получить оценку задержки и фазы принимаемого сигнала с минимальной среднеквадратичной ошибкой. Приемник сигнала, построенный на основе демодулятора Витерби позволяет принимать сигнал с флуктуирующей задержкой с дисперсией не более  $10^{-2} T^2$  и флуктуирующей фазой с дисперсией не более  $10^{-3} \text{ рад}^2$  с вероятностью ошибки, сопоставимой с вероятностью ошибки при приеме сигнала с известной задержкой и фазой. Лабораторный макет модема сигнала, построенный на основе синтезированных алгоритмов синхронизации, показал, что приемник может быть реализован в полностью цифровом исполнении на базе одного кристалла ПЛИС.

Все сказанное обуславливает актуальность проведенного исследования.

## **2. Научная новизна и практическая значимость работы**

В диссертационной работе изложены научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в ускорение научно-технического прогресса в области методов приема и

синхронизации цифровых сигналов с циклически изменяющимся индексом модуляции.

**Научная новизна работы заключается в следующем:**

1. На основе методов оптимальной нелинейной фильтрации синтезированы новые алгоритмы совместной оценки фазы, задержки и индекса модуляции, применимые к сигналам ЦИИМ с рациональным индексом модуляции и произвольным частотным откликом.
2. Разработаны новые упрощенные неоптимальные алгоритмы синхронизации, интегрированные в демодулятор Витерби, широко используемый для детектирования сигналов ЦИИМ.
3. Построена программно-математическая модель полностью цифрового приемника сигнала ЦИИМ. С помощью данной модели впервые проведено всестороннее исследование динамических характеристик синтезированных алгоритмов синхронизации.
4. На базе микросхем с программируемой логикой реализованы формирователь и устройство демодуляции сигналов ЦИИМ.

**Практическая значимость работы заключается в следующем:**

1. Разработанные алгоритмы фазовой и тактовой синхронизации позволят при их внедрении в перспективные разработки систем передачи дискретной информации осуществлять прием сигнала ЦИИМ с флуктуирующей задержкой и фазой с вероятностью ошибки, близкой к вероятности ошибки при идеальной фазовой и тактовой синхронизации.
2. Разработанные алгоритмы оценки задержки и фазы легко интегрируются в структуру демодулятора Витерби, широко используемого для приема и обработки сигналов ЦИИМ.
3. Разработанная программно-математическая модель системы передачи информации позволяет исследовать работу вновь проектируемых приемников и систем синхронизации сигналов ЦИИМ как в

установившемся, так и в переходном режиме при различном характере поведения задержки и фазы сигнала.

4. Предложены способы реализации модулятора и демодулятора сигналов ЦИИМ, защищенные патентами.
5. Разработан макет цифрового приемо-передающего узла энергетически эффективной помехозащищенной аппаратуры передачи данных спутниковых радиолиний, использующей сигналы ЦИИМ.

### **3. Достоверность и обоснованность научных результатов**

Достоверность научных результатов подтверждается следующими основаниями:

1. Программно-математическая модель, построенная для исследования синтезированных алгоритмов синхронизации, использовалась для исследования известных из печати методов приема и синхронизации сигналов ЦИИМ. Результаты моделирования находятся в полном соответствии с результатами, опубликованными в работах российских и зарубежных авторов.
2. Результаты моделирования системы синхронизации, такие как время вхождения в синхронизм и полоса удержания, полностью совпадают с результатами экспериментального исследования, полученными с помощью лабораторного макета приемника сигнала ЦИИМ, построенного на основе ПЛИС Spartan-3A фирмы Xilinx.
3. Качество передаваемого сигнала контролировалось с помощью цифрового осциллографа Tektronix TDS-2024.
4. Вероятность ошибки при приеме сигнала ЦИИМ (0,5;0,75) с флуктуирующей задержкой и фазой, полученная лабораторным путем, полностью совпадает с вероятностью ошибки, полученной с помощью имитационного моделирования и статистического усреднения.

#### **4. Ценность научных работ соискателя**

Разработанные в работе алгоритмы фазовой, тактовой и цикловой синхронизации при приеме сигналов ЦИИМ и построенный на их основе лабораторный макет цифрового приемо-передающего узла использованы в «НИИ КС им. А.А. Максимова» при выполнении научно-исследовательской работы «Разработка и создание приемо-передающих узлов энергетически эффективной помехозащищенной аппаратуры передачи данных спутниковых радиолиний и аппаратуры контроля», проводимой в рамках программы Союзного государства «Разработка базовых элементов, технологий создания и применения орбитальных и наземных средств многофункциональной космической системы» («Космос-НТ»), а также в АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга» в работах, направленных на совершенствование аппаратуры систем передачи данных для радиоканалов со сложной помеховой обстановкой.

Материалы разделов 3 и 5 диссертации, связанные с синтезом и анализом алгоритмов синхронизации сигналов с циклически изменяющимся индексом модуляции используются в курсах «Методы и устройства синхронизации в радиосистемах передачи информации» и «Цифровые системы передачи информации», читаемых на кафедре радиосистем передачи информации ИРТС РТУ МИРЭА.

#### **5. Личное участие автора в получении научных результатов**

Все полученные в диссертационной работе научные результаты, а также практическая реализация лабораторного макета модема сигнала ЦИИМ (0,5;0,75) на базе ПЛИС Xilinx выполнены непосредственно автором, либо при его определяющем участии.

#### **6. Апробация работы и публикации**

Основные теоретические и практические результаты работы доложены и обсуждены на следующих научно-технических конференциях:

- 59-й, 60-й и 61-й Научно-технических конференциях МИРЭА, Москва, 2010, 2011 и 2012 гг.
- 16-й Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Москва, 2010.
- 12-й Международной конференции и выставке «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2010», Москва, 2010.
- 2-й Международной заочной научно-технической конференции «Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2012), Тольятти, 2012.
- 7-й Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь», Москва, 2013.
- 1-й и 3-й Международной научно-практической конференция «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем» (РАДИОИНФОКОМ), Москва, 2013 и 2017 гг.

**По теме диссертации опубликовано 5 статей в рецензируемых научных изданиях, в том числе 4 из перечня, рекомендованного ВАК, 2 из которых – в переводных журналах, индексируемых в международных базах цитирования WoS и Scopus, и 10 публикаций в научно-технических сборниках и трудах международных и российских конференций.**

#### **Список основных публикаций по теме диссертационной работы**

1. **Унгер А.Ю., Суханов П.Г.** Реализация цифрового модема сигнала с циклически изменяющимся индексом модуляции // Научный вестник МИРЭА. – 2011. – №1(10). – с. 22-27.
2. **Унгер А.Ю., Бондарев Ю.С.** Реализация модулятора сигнала ЦИИМ на базе ПЛИС // Научный Вестник МГТУ ГА. – 2011. – №164(2). – с. 5-10.
3. **Куликов Г.В., Унгер А.Ю., Суханов П.Г.** Фазовая и тактовая синхронизация демодулятора Витерби сигналов с непрерывной фазой // Радиотехника и электроника. – 2011. – Т. 5, № 6. – с. 705–711.

4. **Унгер А.Ю.**, Куликов Г.В. Алгоритмы синхронизации для приема модулированных сигналов с непрерывной фазой и циклически изменяющимся индексом модуляции // Радиотехника и электроника. – 2014. – Т. 59, №11. – с. 1118-1124.
5. **Унгер А.Ю.**, Куликов Г.В. Алгоритм синхронизации сигналов ЦИИМ с произвольным индексом модуляции // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2018. – №1. – с. 58-65.

В опубликованных работах полностью изложены основные научные и технические результаты диссертации, подробно представлены проведенные экспериментальные исследования.

## **7. Соответствие диссертации требованиям, установленным п. 14**

### **«Положения о присуждении ученых степеней»**

Диссертация и автореферат Унгера А.Ю. прошли проверку на наличие неправомерных заимствований.

Оценка оригинальности:

Диссертация: 85%

Автореферат: 88%.

В диссертации отсутствуют заимствованные материалы без ссылок на авторов и (или) источники заимствования.

В диссертации отсутствуют результаты научных работ, выполненные соискателем ученой степени в соавторстве, без ссылок на соавторов.

Представленная Унгером А.Ю. диссертационная работа соответствует специальности 05.12.04 Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения в части пункта 4 и пункта 6 паспорта специальности ВАК.

Диссертационная работа «Алгоритмы синхронизации при приеме сигналов с циклически изменяющимся индексом модуляции» Унгера Антона Юрьевича соответствует п. 9 Положения ВАК РФ «О присуждении ученых степеней» предъявляемым к кандидатской диссертации, так как содержит решение актуальной радиотехнической задачи, а именно, повышение

качества передачи дискретной информации по радиоканалам путем синтеза новых алгоритмов синхронизации, позволяющих оценивать задержку и фазу принимаемого сигнала ЦИИМ с минимальной среднеквадратичной ошибкой.

Диссертационная работа представляет собой законченную научно-квалификационную работу, и рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.04 Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Заключение принято на расширенном заседании кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиотехнических и телекоммуникационных систем РТУ МИРЭА. Присутствовало на заседании 13 человек. Результаты голосования: «за» - 13 человек, «против» - нет, «воздержалось» - нет.

Протокол заседания кафедры №11/1718 от 06 июня 2018 г.

Заведующий кафедрой  
радиоэлектронных систем и комплексов  
ИРТС РТУ МИРЭА

д.т.н., доцент

С.Н. Замуруев

Ученый секретарь

доцент

Т.Э. Гельфман