РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН
(ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)

УДК 004.057.4
№ госрегистрации 01201068165
Инв. № о-5139

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор ИРЭ
им. В.А. Котельникова РАН
академик РАН

_____ Гуляев Ю.В.
«__» _____ 2012 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по Государственному контракту от 20 сентября 2010 г. № 14.740.11.0392
Шифр заявки «2010-1.1-214-137-064»

В рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы

по теме:
«Разработка нового поколения аппаратуры гибридных каналов передачи мультимедийной информации на базе лазерной и радио технологий»
(итоговый, этап №5)

Наименование этапа «Разработка архитектуры оборудования гибридного канала на базе лазерной и радио технологий»

Научный руководитель работ:
Д-р технических наук, академик РАН _____ Н.А.Кузнецов

Москва, 2012 г.

Список исполнителей

Руководитель темы, д-р технических наук, академик РАН	_____ подпись, дата	Н. А. Кузнецов (введение,1,2,3,4,заключение)
ст. науч. сотр., д-р физ.-мат.наук	_____ подпись, дата	Е.В.Ефремова (раздел 2,3,5)
науч. сотр., канд. физ.-мат.наук	_____ подпись, дата	А.В.Клецов (раздел 1,2)
науч. сотр., канд. физ.-мат.наук	_____ подпись, дата	А.С.Соболев (раздел 4)
ст. науч. сотр., канд.филос.наук	_____ подпись, дата	Н.А.Гречишкина (раздел 1,2,3,4,5)
студент, аспирант	_____ подпись, дата	А.В.Юдин (раздел 1,2,3,4)
студент, вед.инженер	_____ подпись, дата	Ашихмин А.В. (раздел 3,4,5) МФТИ (Государственный университет)
Нормоконтролер ученый секретарь, канд.физ-мат.наук,	_____ подпись, дата	И.И.Чусов
Соисполнители:		
профессор, д-р технических наук,	_____ подпись, дата	В.М.Вишневский (раздел 1,2,3,4,5) ЗАО НПФ «Инсет»
ст. науч. сотр., канд. физ.-мат.наук	_____ подпись, дата	О.В.Семенова (раздел1, 2,3,4,5) ЗАО НПФ «Инсет»
ст. науч. сотр., канд. технических наук	_____ подпись, дата	Р.В.Железов (раздел 1,2,3,4) ЗАО НПФ «Инсет»
науч. сотр., канд. технических наук	_____ подпись, дата	К.О.Поваров (раздел 3,4,5) ЗАО НПФ «Инсет»
вед. науч. сотр., канд. технических наук	_____ подпись, дата	Винель А. В. (раздел 3,4,5) ЗАО НПФ «Инсет»
аспирант	_____ подпись, дата	А.А.Ларионов (раздел 2,3,4,5)

		ИППИ им. А.А.Харкевича РАН
аспирант	_____ подпись, дата	С.А.Фролов (раздел 2,3) ИППИ им. А.А. Харкевича РАН
аспирант	_____ подпись, дата	Ю.А.Дмитриев (раздел 3,4,5) МФТИ (Государственный университет)
аспирант	_____ подпись, дата	В.А.Лазарев (раздел 1,2) МФТИ (Государственный университет)
аспирант		Н.Г.Рябых (раздел 1) МФТИ (Государственный университет)
аспирант	_____ подпись, дата	С.Ю.Шаров (раздел 2,3) МФТИ (Государственный университет)
студент, аспирант	_____ подпись, дата	А.Ю.Титов (раздел 2,3,4) МФТИ (Государственный университет)
студент	_____ подпись, дата	Сиреканян В.В. (раздел 3,4,5) МФТИ (Государственный университет)
студент	_____ подпись, дата	Д.С.Давидюк (раздел 2,3,4) МФТИ (Государственный университет)
студент	_____ подпись, дата	О.В.Трушина (раздел 2,3,4) МФТИ (Государственный университет)
студент	_____ подпись, дата	О.М.Цыганова (раздел 2,3,4,5) МФТИ (Государственный университет)

Реферат

Итоговый отчет о НИР содержит 261 страницу, 68 рисунков, 21 таблицу, 4 приложения.

Ключевые слова: широкополосные и сверхширокополосные беспроводные сети, атмосферные оптические каналы связи, надежность и быстродействие.

Основанием для выполнения работ является государственный контракт № 14.740.11.0392 на выполнение НИР «Разработка нового поколения аппаратуры гибридных каналов передачи мультимедийной информации на базе лазерной и радиотехнологий.

Целью НИР является разработка принципов построения и реализация нового поколения высокоскоростных (до 10 Гбит/с) и надежных каналов передачи мультимедийной информации в отличие от существующего оборудования для комплектации беспроводных сетей со скоростями до 150 Мбит/с.

В отчете о НИР проведен анализ научно-технической литературы и нормативно-технической документации (стандартов) по проблемам широкополосной и сверхширокополосной связи (частотные диапазоны 2,4 – 6,4 ГГц, 71-77 ГГц, 81 – 85 ГГц). Рассмотрены направления развития аппаратно-программных средств гибридных каналов связи. Приведены методы расчета и выбора оптимальных параметров разрабатываемых гибридных каналов связи. Исследованы влияния шумов и помех на выбор параметров гибридной линии связи. Дан сравнительный анализ существующих протоколов беспроводных сетей мультимедийной информации. Проведено исследование двух моделей гибридного канала передачи данных: модели с резервным радиоканалом (когда оптический канал и радиоканал используются поочередно – холодный резерв радиоканала) и модели с параллельным использованием радиоканала – горячий резерв радиоканала миллиметрового диапазона радиоволн. Дано описание разработанного пакета прикладных программ, на базе которого проведен численный анализ вариантов построения гибридного канала передачи мультимедийной информации. Дано описание переключения между каналами гибридной системы, разработаны и исследованы механизмы и алгоритмы переключения, осуществлен выбор оптимальных параметров переключения, дано описание электронной схемы интерфейсной платы. Дано описание архитектуры блока аппаратуры атмосферной оптической линии связи и резервной широкополосной радиолинии, а также аппаратно-программного комплекса сопряжения основного и резервного канала. Приведено обобщение результатов предыдущих этапов работ. Дана оценка полноты решения задач и их сравнение с современным научно-техническим уровнем. Дано также описание программы внедрения результатов НИР в образовательный процесс в МФТИ на кафедре «Инфокоммуникационных систем и сетей».

Содержание

Введение ……. 8

Основная часть

1 Анализ состояния и перспектив развития широкополосных беспроводных средств передачи мультимедийной информации.

1.1 Анализ научно-технической литературы, нормативно-технической документации по проблемам широкополосных и сверхширокополосных беспроводных средств передачи мультимедийной информации …….

1.1.1 Обзор научно-технической литературы по проблемам создания гибридных каналов связи на базе радио и лазерной технологий ……. 10

1.1.2. Зарубежные и отечественные стандарты и нормативно-техническая документация, регламентирующие разработку и изготовление аппаратуры беспроводной связи ……. 11

1.2. Анализ направлений развития лазерных каналов и широкополосных радио средств, функционирующих в частотных диапазонах 2,4 – 6,4 ГГц, 71-76 ГГц и 81-85 ГГц …….

1.2.1. Технология атмосферных оптических линий связи и направления ее развития ……. 14

1.2.2. Радиорелейные каналы связи в миллиметровом диапазоне радиоволн… 16

1.2.3. Резервирование лазерного канала широкополосным беспроводным каналом IEEE 802.11n …… 21

1.3. Исследование состояния и перспектив развития аппаратно-программных средств гибридных каналов передачи мультимедийной информации на базе радио и лазерных технологий …….. 38

1.4. Выбор оптимальных параметров протокола, обеспечивающих максимальную производительность канала передачи мультимедийной информации ……... 36

1.5. Исследование влияния шумов и помех на выбор оптимальных параметров протокола передачи информации ……... 40

1.6. Анализ динамики развития стандартов широкополосных беспроводных средств IEEE 802.11, IEEE 802.16, CDMA-2000, UMTS (LTE), их сравнительный анализ ……. 51

2. Разработка математических моделей для оценки характеристик производительности и надежности гибридного канала связи

2.1 Разработка математической модели гибридного канала с использованием методов теории стохастических систем и сетей для оценки производительности и надежности

2.1.1 Математическая модель гибридного беспроводного канала связи с резервным радиоканалом (холодный резерв радиоканалом IEEE

802.11n 57
2.1.2 Вложенная цепь Маркова……. 58
2.1.3 Матрично-аналитический метод вычисления стационарных вероятностей…….. 61
2.1.4 Стационарное распределение вероятностей состояний системы в произвольный момент времени……. 64
2.1.5 Условия существования стационарного режима……... 65
2.1.6 Характеристики производительности системы……. 67
2.1.7 Математическая модель гибридного беспроводного канала связи с параллельным использованием радиоканала (горячий резерв радиоканала в Е- диапазоне 71-76 ГГц и 81-86 ГГц)……. 67
2.1.8 Марковский процесс, описывающий состояния системы, и условия эргодичности…. 68
2.1.9 Стационарное распределение марковского процесса, описывающего состояния системы…….. 69
2.1.10 Характеристики производительности системы……. 70

2.2 Разработка машинной (имитационной) модели гибридного канала 71
2.3 Проведение патентных исследований по ГОСТ 15.011-96……...
2.3.1 Технический уровень и тенденции развития…… 73
2.3.2 Предложения по использованию результатов патентных исследований…… 73

2.4 Проведение статистической обработки метеоданных и отыскание функций распределения периодов доступности и недоступности атмосферного оптического канала 74
3 Разработка пакета прикладных программ. Выбор оптимальных параметров и сравнительный анализ вариантов построения гибридного канал
3.1 Разработка комплекса программных средств аналитического и имитационного моделирования гибридного канала связи……...
3.1.1 Общее описание пакета программ аналитического и машинного гибридного канала связи……. 78
3.1.2. Архитектура пакета прикладных программ…….. 80
3.1.3. Функциональный блок для численного анализа математических моделей…… . 89
3.1.4. Входные параметры для расчета аналитической и машинной модели гибридного канала связи…… 92
3.2 Отладка алгоритмов работы устройств в составе системы, оптимизация этих алгоритмов……
3.2.1 Отладка и оптимизация алгоритмов работы…….. 102
3.2.2 Руководство пользователя и системного программиста…….. 103
3.2.3. Описание применения пакета программ аналитического и машинного моделирования……. 107
3.3. Анализ численных результатов выбора оптимальных параметров и сравнительного анализа вариантов построения гибридного канала…… 109
3.4 Сопоставление результатов моделирования с результатами расчетов…….. 118

4 Разработка схемотехнических решений интерфейса, поддерживающего технологию переключения между основным (оптичес-ким) и резервным (радио) каналами

4.1 Разработка и исследование механизмов и алгоритмов переключения между основным и резервным каналами……. 122

4.2. Проведение выбора оптимальных параметров переключения из соотношения сигнал/шум, изменения скорости передачи информации и т.д……... 135

4.3 Проведение выбора элементной базы. Разработка электронной схемы интерфейсной платы…….. 140

5 Разработка архитектуры оборудования гибридного канала на базе лазерной и радио технологий

5.1 Разработка архитектуры блока аппаратуры атмосферной оптической линии связи и аппаратуры широкополосного радио доступа 166

5.2 Обобщение результатов предыдущих этапов работ. Оценка полноты решения задач и эффективности полученных результатов в сравнении с современным научно-техническим уровнем……. 177

5.3 Разработка программы внедрения результатов НИР в образовательный процесс…… 181

5.4 Разработка аппаратно-программного комплекса сопряжения основного и резервного каналов……. 182

Заключение. 188

Список использованных источников…..……. 191

Приложение 1. Отчет о патентных исследованиях 196

Приложение 2. Заявка о выдаче патента на изобретение «Многоканальная система передачи информации повышенной надежности на базе лазерной и радио технологий». 212

Приложение 3. Заявка на свидетельство о регистрации программ для ЭВМ «Пакет программ аналитического и машинного (имитационного) моделирования гибридного канала связи на базе лазерной и радио технологий». 219

Приложение 4. Листинг программ. 222

Введение

Быстрое и непрерывное увеличение количества пользователей сети Интернет и соответствующее увеличение объемов передаваемой мультимедийной информации выдвигает в ряд первоочередных задач повышение производительности и надежности каналов связи для решения проблемы «последней мили». Работы по увеличению быстродействия и качества широкополосных беспроводных каналов связи ведутся во многих исследовательских центрах и стандартизирующих организациях всего мира. В конце 2009 г. Институт инженеров по электротехнике и электронике (Institute of electrical and electronics engineers (IEEE)) опубликовал высокоскоростной стандарт IEEE 802.11n. На базе этого стандарта разработана аппаратура, обеспечивающая номинальную скорость передачи информации в беспроводном канале связи до 300 Мбит/с, что значительно превышает быстродействие существующих каналов WiFi и WiMAX (номинальная скорость существующих беспроводных каналов составляет 54 Мбит/с).

В начале 2012 г. опубликован новый стандарт IEEE 802.11-2012, на базе которого будут реализовываться беспроводные сети со скоростью передачи информации до 600 Мбит/с; в конце 2012 г. планируется появление LTE Advanced (релиз 10) – стандарт сотовой связи 4 G со скоростью передачи мультимедийной информации до 1000 Мбит/с в нисходящем канале и 500 Мбит/с в восходящем канале.

Одним из перспективных направлений повышения производительности и надежности беспроводного канала связи является создание гибридных каналов на базе лазерной и радио-технологий. Оборудование, реализующее гибридный канал, объединяет преимущества лазерных атмосферных каналов связи (высокая скорость передачи информации в дуплексном режиме) и широкополосных радиосредств (возможность эффективной работы в неблагоприятных погодных условиях: туман, снег и т.д.). Основным режимом работы комбинированных приемопередатчиков является лазерный режим. При ухудшении соотношения сигнал-шум осуществляется переход на широкополосный радио-режим, а после восстановления качества атмосферного оптического канала происходит обратный переход. При этом радиоканал может либо прекращать работу при использовании лазерного канала, либо параллельно использоваться для передачи данных.

В отчете о НИР проведен анализ научно-технической литературы в области широкополосных и сверхширокополосных беспроводных сетей на базе материалов новейших статей в отечественных и зарубежных журналах. Дано описание зарубежных стандартов беспроводной связи и отечественной нормативно-технической документации, регламентирующей архитектуру, разработку и внедрение гибридных каналов связи на базе лазерной и радио технологий.

Проведен анализ состояния и перспектив развития аппаратно-программных средств гибридных каналов связи. Дан сравнительный анализ характеристик аппаратуры лазерных и гибридных каналов, выпускаемой в настоящее время зарубежными и отечественными фирмами. Показана актуальность разработки новой аппаратуры для создания высокоскоростных гибридных каналов (скорость передачи в лазерном канале до 10 Гбит/с, в резервном от 300 Мбит/с при использовании протокола IEEE 802.11n и до 5 Гбит/с при реализации в миллиметровом диапазоне радиоволн).

Дано описание основных критериев оценки качества функционирования гибридных каналов передачи мультимедийной информации на базе лазерной и радиотехнологий, методов их расчета и оптимизации.

Проведено исследование двух моделей гибридного канала передачи данных: модели с резервным радиоканалом (когда оптический канал и радиоканал используются поочередно – холодный резерв радиоканала IEEE 802.11n) и модели с параллельным использованием радиоканала – горячий резерв радиоканала миллиметрового диапазона радиоволн.

Рассмотрены существующие отечественные и зарубежные патенты, которые могут быть выбраны в качестве прототипа к изобретению, предлагаемому по результатам настоящего НИР. Проведена статистическая обработка метеоданных и построены функции распределения периодов доступности и недоступности оптического канала.

В отчете дано описание разработанного пакета прикладных программ, на базе которого проведен численный анализ вариантов построения гибридного канала передачи мультимедийной информации.

В отчете дано описание технологии переключения, разработаны и исследованы механизмы и алгоритмы переключения, осуществлен выбор оптимальных параметров переключения, дано описание электронной схемы интерфейсной платы.

Дано описание архитектуры блока аппаратуры атмосферной оптической линии связи и резервной широкополосной радиолинии, а также аппаратно-программного комплекса сопряжения основного и резервного канала. Приведено обобщение результатов предыдущих этапов работ. Дана оценка полноты решения задач и их сравнение с современным научно-техническим уровнем. Дано также описание программы внедрения результатов НИР в образовательный процесс в МФТИ на кафедре «Инфокоммуникационных систем и сетей».

1.1. Анализ научно-технической литературы, нормативно-технической документации по проблемам широкополосных и сверхширокополосных беспроводных средств передачи мультимедийной информации

1.1.1. Обзор научно-технической литературы по проблемам создания гибридных каналов связи на базе радио и лазерной технологий

Широкополосные беспроводные сети и каналы связи стали в настоящее время одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. Этот факт нашел отражение в многочисленных зарубежных монографиях [2, 3, 4, 27], статьях в специализированных журналах IEEE Wireless Communicaions Magazine, IEEE Communications Magazine, IEEE Network: The Magazine of Global Internetworking и трудах конференций [IEEE GLOBECOM, IEEE INFOCOM, ICUMT, NetWare, DCCN и многих других], где исследовались архитектура, методы оценки и оптимизации параметров протоколов, математические модели расчета производительности и надежности беспроводных сетей и каналов связи и т.д. Исследованию широкополосной связи посвящены и отечественные монографии, например [1, 5] и отдельные статьи в журналах: Автоматика и телемеханика, Радиоэлектроника, Проблемы информатики, Электроника: НТБ, Беспроводные технологии и т.д.

Рассмотрим далее краткий обзор научно-технической литературы, опубликованной в последние годы по вопросам проектирования и применения гибридных каналов связи на базе радио и лазерной технологий. В [6-12] проведен анализ возможных комбинаций атмосферных оптических линий и радиолиний, а также их использование для решения проблемы «последней мили» в мобильных сотовых и ad-hoc сетях, совместно с наземными и спутниковыми линиями связи. В работах [13-15] обсуждаются механизмы переключения основного (лазерного) канала на резервный радиоканал. Рассматриваются два основных подхода для построения гибридных систем. Первый заключается в том, что все время параллельно работают обе линии, тем самым приводя к потере 50% доступной пропускной способности, вызванной дублирующей передачей данных. Во втором подходе используется механизм переключения, таким образом, что бо́льшую часть времени функционирует только одна линия, тем самым это позволяет уменьшить объем излишне передаваемых данных и использовать резервный канал только по мере необходимости, в случае когда в основном канале возникают ошибки. Однако во всех этих работах предложенный механизм переключения не использует пропускную способность резервного канала, если доступен основной.

В работах [16, 17] рассматривается и третий вариант. Предлагается механизм переключения позволяющий увеличить полезное использование пропускное способности каналов, применяя механизм распределения нагрузки, когда оба канала доступны. Кроме

того, если линия не доступна, то механизм продолжает следить за каналом, до тех пор, пока связь не восстановится. В большинстве работ, например [16], механизм переключения основывается на сравнении уровня полученного сигнала с пороговым значением. Однако, по всей видимости, такой механизм переключения обладает большим количеством недостатков, поэтому в последнее время появились работы, предлагающие альтернативные способы переключения [17].

Анализу характеристик производительности гибридных каналов связи посвящены работы [13, 18-23]. При этом в [13, 20-23] для анализа используется имитационное моделирование, а в [18, 19] аналитические подходы на базе теории очередей.

В качестве резервного канала могут быть использованы различные технологии беспроводной связи. Необходимо отдельно выделить системы связи прямой видимости, работающие в миллиметровом диапазоне радиоволн [24-30], которые обеспечивают гигабитные скорости передачи при достаточно высокой надежности на расстояние порядка нескольких километров. Основными недостатками таких систем является относительно высокая цена современных коммерческих реализаций. Другим распространенным классом систем беспроводной связи, обеспечивающих резервирование лазерного канала, являются системы, основанные на стандартах семейства IEEE 802.11. В эту категорию, в частности, попадают системы, реализующие стандарт 802.11n [31], позволяющие достичь скорость передачи данных порядка 300 Мбит/с.

1.1.2. Зарубежные и отечественные стандарты и нормативно-техническая документация, регламентирующие разработку и изготовление аппаратуры беспроводной связи

Разработка оборудования и архитектуры беспроводных каналов связи и сетей регламентируется стандартами и другими нормативно-техническими документами. В частности WiFi и WiMAX сети должны удовлетворять стандарту IEEE 802.11 и IEEE 802.16 соответственно. Работы в области стандартизации WiFi были начаты в середине 90-х годов, когда была организована соответствующая рабочая группа 11-го комитета IEEE 802.

В июле 1997 года в результате работы этой группы был опубликован стандарт IEEE 802.11 «Спецификация физического уровня и уровня контроля доступа к каналу передачи беспроводных локальных сетей» (Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications). Он определял архитектуру сети и вытекающие из этого требования к функциям устройств, принципы доступа устройств к каналам связи, формат пакетов передачи, способы аутентификации и защиты данных. Хотя стандарт изначально

задумывался как инвариантный по отношению к какому-либо частотному диапазону, на физическом уровне он определял три способа работы: два радиочастотных и оптический. В инфракрасном диапазоне предусматривалась импульсно-позиционная модуляция, в диапазоне 2,400-2,4835 ГГц – режимы модуляции с расширением спектра методом частотных скачков (FHSS) и методом прямой последовательности (DSSS). Скорости обмена устанавливались на уровне 1 и 2 Мбит/с.

В дальнейшем стандарт IEEE 802.11 непрерывно совершенствовался в направлении повышения качества функционирования сетей, реализуемых на базе этого стандарта, и, что особенно важно, в направлении скорости передачи информации. Последним в конце 2009 г. был принят стандарт IEEE 802.11n, обеспечивающий скорость передачи информации в канале до 300 Мбит/с. Логическая и физическая структура беспроводных сетей стандарта описана в разделе 3 настоящего отчета. Такие высокоскоростные WiFi каналы предлагаются в настоящем отчете в качестве резервных каналов в гибридной линии связи.

Стандартизация оборудования второго типа каналов связи, предлагаемого в настоящем проекте в качестве резервной линии связи, началась в 2005-2006 гг. В марте 2005 г. была сформирована целевая группа 3c (TG3c) комитета IEEE 802.15, работающего в области стандартизации персональных сетей (этому предшествовала двухлетняя работа по изучению проблемы). Через год образовался тесно сотрудничающий с этой группой промышленный альянс WirelessHD. В него вошли такие ведущие производители бытовой электроники, как LG Electronics, Matsushita Electric (Panasonic), NEC, Samsung, Sony и Toshiba, а также американская компания SiBeam - fabless-произво-дитель элементной базы. Позднее к ним присоединился ряд других компаний, в том числе Intel, Broadcom и Philips. Спецификация WirelessHD появилась в январе 2008 года, утверждена как промышленный стандарт - в сентябре 2009 года. Она основывалась на работах группы TG3c IEEE. Сама спецификация, дополнение IEEE 802.15.3c Millimeter-wave-based Alternative Physical Layer Extension к стандарту персональных сетей IEEE 802.15.3, была одобрена в сентябре и опубликована 12 октября 2009 года.

Одновременно в Европе в декабре 2008 года был принят стандарт Европейской ассоциации по стандартизации информационных и коммуникационных систем (ECMA) - ECMA-387 High Rate 60 GHz PHY, MAC and HDMI PAL. 15 ноября 2009 года он был опубликован как стандарт ISO/IEC 13156. Стандарт этот также ориентирован на персональные сети. В его создании участвовали такие фирмы, как Panasonic, Phillips, IBM, Ericsson, Newlans и GEDC (Georgia Electronic Design Center).

В 2009 году организовалась целевая группа, работающая над стандартом IEEE 802.11ad, посвященным уже локальным беспроводным сетям в диапазоне 60 ГГц. В задачи

рабочей группы входит разработка дополнений к существующим стандартам 802.11, в том числе спецификация физического и канального уровней для обеспечения связи беспроводных устройств, работающих на 60 ГГц и выше, на гигабитных скоростях. Выпуск первой версии стандарта запланирован на конец 2012-го года.

В Российской федерации аппаратура лазерных каналов связи регламентируется ГОСТом Р50723 «Лазерная безопасность. Общие требования при разработке и эксплуатации лазерных изделий» и СНиП № 5804 «Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров». 13 июля 2009 г. утвержден ГОСТ Р53363 «Цифровые радиорелейные линии», на основании которого в настоящем проекте будут сформулированы допустимые технические требования к радиочастотной части оборудования гибридного канала связи.

Нормативно-техническими документами, регламентирующими разработку и эксплуатацию каналов связи миллиметрового диапазона радиоволн, являются:

- Приказ Министерства связи и массовых коммуникаций РФ от 14 сентября 2010 г. «Об утверждении Правил применения оборудования радиодоступа для беспроводной передачи данных в диапазоне от 30 МГц до 66 ГГц;

- Решение Государственной комиссии по радиочастотам (ГКРЧ) при Министерстве информационных технологий и связи РФ приняла решение № 10-07-04-1,2 от 15 июля 2010г. «Об упрощении процедуры выделения полос радиочастот 71-76 ГГц, 81-86 ГГц и 92-95 ГГц…..». В решении отмечается, что указанные полосы радиочастот являются одними из перспективных участков радиочастотного спектра, предназначенных для создания радиорелейных линий связи небольшой протяженности.

Проводимые Международным союзом электросвязи в рамках Исследовательских комиссий работы выявили возможность внедрения в этих полосах радиочастот перспективных РРС прямой видимости. В Российской Федерации указанные полосы радиочастот также начинают активно осваиваться такими РЭС.

В целях содействия процессу внедрения новейших перспективных технологий, а также признавая необходимость упрощения процедуры и сокращения сроков оформления разрешительных документов на использование полос радиочастот 71-76 ГГц, 81-86 ГГц и 92-95 ГГц для разработки, производства, модернизации и применения в Российской Федерации РРС прямой видимости, ГКРЧ решила:

- выделить полосы радиочастот 71-76 ГГц, 81-86 ГГц и 92-95 ГГц для разработки, производства и модернизации юридическими и физическими лицами РРС прямой видимости без оформления отдельных решений ГКРЧ для каждого конкретного типа РРС

при условии, что основные технические характеристики разрабатываемых, производимых и модернизируемых РРС соответствуют прилагаемым техническим характеристикам.

1.2. Анализ направлений развития лазерных каналов и широкополосных радио средств, функционирующих в частотных диапазонах 2,4 – 6,4 ГГц, 71-76 ГГц и 81-85 ГГц.

1.2.1. Технология атмосферных оптических линий связи (АОЛС) и направления ее развития

Технология АОЛС (её также называют FSO – Free Space Optics, БОКС – Беспроводной Оптический Канал Связи, или ЛАЛ – Лазерная Атмосферная Линия) основывается на передаче данных модулированным излучением в инфракрасной (или видимой) части спектра через атмосферу и их последующим детектированием оптическим фотоприёмным устройством. При этом в качестве излучателя обычно используются инфракрасные лазеры класса 1 или 1М (к лазерам 1-го класса относят полностью безопасные лазеры, выходное коллимированное излучение которых не представляет опасности при облучении глаз и кожи) Для низкоскоростных коммуникаций на небольшие расстояния могут использоваться светодиоды. В качестве приёмника используются лавинные или кремниевые фотодиоды.

К основным преимуществам атмосферных оптических линий связи относятся:

- высокая пропускная способность и качество цифровой связи. Современные FSO-решения могут обеспечить скорость передачи цифровых потоков до 10 Гбит/с при показателе битовых ошибок всего 10^{-12}, что невозможно достичь при использовании любых других беспроводных технологий;
- отсутствует необходимость получения разрешения на использование частотного диапазона. FSO-системы используют инфракрасный диапазон электромагнитного спектра далеко за границей 400 ГГц (определенной как верхняя граница для радиочастотного регулирования на территории РФ), поэтому никаких лицензий и специальных разрешений не требуется;
- высокая защищённость канала от несанкционированного доступа и скрытность. Ни одна беспроводная технология передачи не может предложить такую конфиденциальность связи как лазерная. Перехватить сигнал можно только установив сканеры-приемники непосредственно в узкий луч от передатчиков. Реальная сложность выполнения этого требования делает перехват практически невозможным. А отсутствие ярко выраженных внешних признаков (в основном, это электромагнитное излучение) позволяет скрыть не только передаваемую информацию, но и сам факт информационного

обмена. Поэтому лазерные системы часто применяются для разнообразных приложений, где требуется высокая конфиденциальность передачи данных, включая финансовые, медицинские и военные организации;

- высокий уровень помехоустойчивости и помехозащищенности. FSO-оборудование невосприимчиво к радиопомехам и само их не создаёт;
- возможность установить лазерную атмосферную линию там, где затруднительно проложить проводную линию связи.

В общем, технология является альтернативой традиционным беспроводным линиям радиосвязи с частотами в диапазонах 2.5 и 5.6 ГГц и оптоволоконным линиям связи. Система АОЛС может быть развернута очень быстро, если есть доступ к электроэнергии и есть возможность закрепить приемо-передатчик на стабильной платформе. Это позволяет использовать систему также для временных решений таких как, например, массовые мероприятия или встречи в местах, где отсутствует широкополосный доступ в интернет. Однако система может быть также использована и для обеспечения постоянной связи на небольших расстояниях (не более 4-5 км) в городских районах использую архитектуру точка-точка или точка-многоточка.

Поскольку воздух имеет хороший коэффициент пропускания в тех же окнах частот, что и оптоволокно, т.е., главным образом, при длинах волн в 850 нм и 1550 нм, то системы АОЛС могут использовать ту же технологию. Это позволяет достичь очень большой пропускной способности для беспроводных систем, вплоть до нескольких Гбит/с, при использовании современных технологий, доступных на сегодняшний день. Технология лазерных атмосферных каналов отличное дополнение к традиционным радиоканалам и волоконно-оптическим каналам. Более того, благодаря линейным характеристикам канала, высокая пропускная способность может быть достигнута, используя кодирование, которое применяется в обычных проводных сетях на физическом уровне. Т.е. нет необходимости в преобразовании кодирования к OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, мультиплексирование с ортогональным частотным разделением сигналов) или к DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum, технология расширение спектра сигнала посредством прямой последовательности). Также нет необходимости в прослушивании среды перед отправкой данных. И в дополнение технология позволяет достичь практических таких же больших пропускных способностей, как и в проводных сетях. Для работы системы АОЛС не нужна лицензия ни в одной стране мира, и в случае если требования по безопасности лазера удовлетворены, что означает, что система должна быть сертифицирована по Классу 1, 1M или Классу 2, то нет никаких ограничений на использование этой технологии. Для 850 нм технологии разрешена меньшая мощность на выходе, однако приемники могут быть

сделаны более чувствительными. Для 1550 нм технологии, напротив разрешена бо́льшая выходная мощность, в то время как приемники немного менее чувствительны. Таким образом, достаточный запас мощности может быть достигнут для обоих типов систем обеспечивая работу в режиме с небольшим количеством ошибок. К тому же, благодаря высокой несущей частоте в 200 и 350 ТГц, направленность луча достаточно высока, даже для небольшого оптического диаметра, что приводит к небольшому диаметру светового пучка и обеспечивает дополнительную безопасность на физическом уровне, в дополнение к любому шифрованию, которое может быть также применено.

Главная проблема для систем атмосферных оптических линий передачи данных – это меняющийся коэффициент затухания в воздухе, который сильно зависит от местного климата (сезонного и суточного) и погодных условий. Затухание, вызванное туманом, имеет наибольшее влияние. Поскольку водяные капельки в тумане имеют такой же порядок размера, как и у длин волн в инфракрасном диапазоне, то это вызывает рассеяние (дифракция Ми), что главным образом сказывается на потере направленности, нежели на потере в мощности светового пучка. Дождь вызывает меньшее затухание, но поскольку капли имеют намного большие размеры по сравнению с длинной волны несущей, то они вызывают геометрическое рассеяние, что является менее критичным. Хлопья снега также могут вызывать большой коэффициент затухания, т.к. они не прозрачны. Эффект от снега зависит от отношения между диаметром светового пучка и диаметра хлопьев. Кроме того такие эффекта как прямые солнечные лучи падающие на приемник, завихрения в воздухе, расстройка пучка или же всей системы также могут ухудшать качество связи или вызывать ошибки при передаче.

1.2.2. Радиорелейные каналы связи в миллиметровом диапазоне радиоволн

Благодаря высокой несущей частоте в пределах от нескольких десятков ГГц до 100 ГГц, системы, работающие в миллиметровом радиодиапазоне, также могут обеспечить достаточно большую скорость передачи данных, сравнимую с АОЛС. При работе на дифракционном пределе, высокая направленность может быть достигнута даже при небольших размерах антенны, порядка 20 см. Несмотря на то, что по всему миру частотный диапазон в пределах до 375 ГГц находится под контролем различных организаций и комиссий, также существует несколько частотных полос (например, 77 ГГц), не требующих лицензирования, при соблюдении некоторых ограничений по мощности и другим параметрам. Наиболее многообещающая технология с точки зрения экономической эффективности и широкого распространения на рынке основана на полупроводниковых

усилителях. Однако для этой новой технологии все еще есть несколько проблем технического плана. Температурный дрифт осцилляторов и фильтров, шум, низкая выходная мощность, быстрое старение устройства под воздействием тепловых нагрузок – все эти проблемы являются наиболее критическими на сегодняшний день. Поскольку с увеличением расстояния, при фиксированной пропускной способности и коэффициенте доступности, цена миллиметровых полупроводниковых радио усилителей значительно возрастает, то и цена всей системы в целом также увеличивается.

Атмосферный радиоканал в миллиметровом диапазоне имеет характеристики отличные от беспроводного лазерного оптического канала. Дождь вызывает наибольшее затухание. С другой стороны влияние тумана на канал значительно меньше (за исключением длин волн, которые поглощаются водяным паром, как, например, при частотах в районе 22 ГГц).

Это взаимодополняющее поведение оптических и радио- систем позволяет выдвинуть концепцию гибридной системы, объединяющей преимущества атмосферной оптической линии передачи данных и радиоканала в миллиметрового диапазоне. Такая система позволит построить беспроводной канал связи предоставляющий большую пропускную способность и обладающей высоким коэффициентом доступности при умеренной стоимости всей системы в целом.

Несмотря на то, что миллиметровый диапазон уже давно привлекает внимание разработчиков аппаратуры связи, его практическое использование до последнего времени ограничивалось частотами не более 40 ГГц. 30 лет назад Международный союз по телекоммуникациям (International Telecommunication Union – ITU) на международной конференции WRC-79 принял решение об использовании миллиметровом диапазоне радиоволн для оказания услуг фиксированной связи. Однако интерес к их использованию появился только в конце 1990-х годов, после того как Федеральная комиссия по связи США (FCC) опубликовала доклад с подробным описанием возможностей систем, работающих на таких частотах. Выделенные частотные полосы хорошо подходят, в частности, для систем, которые должны функционировать при любой погоде, а также для систем прямой связи на расстояниях в несколько километров. Сейчас полосы частот 71–76 и 81–86 ГГц, известные как частоты Е-диапазона, разрешены для систем прямой связи со сверхбольшой пропускной способностью.

Практическому освоению Е-диапазона в системах беспроводной связи способствовали следующие обстоятельства:

- появление электронных компонентов миллиметрового диапазона с приемлемыми параметрами и стоимостью;

- высокая загрузка наиболее активно используемого СВЧ-диапазона (2–38 ГГц) и необходимость поиска альтернативных частотных диапазонов;
- разработка нового поколения мультимедийных систем связи со сверхвысокими скоростями передачи информации.

После принятия в 2005 году Федеральной комиссией по связи США ряда регламентирующих документов и введения облегченной схемы лицензирования появились первые радиосистемы Е-диапазона. Европейские регулирующие организации беспроводной связи последовали за США, и в 2005 году Европейская конференция администраций почт и телекоммуникаций (CEPT) приняла план освоения частотных диапазонов, аналогичный американскому. В 2006 году Европейский институт стандартизации в области телекоммуникаций (ETSI) опубликовал технические правила, касающиеся аппаратуры, работающей на частотах 71–76 и 81–86 ГГц. Эти правила соответствовали требованиям ЕС и разрешали коммерческое использование в Европе беспроводной аппаратуры Е-диапазона. Сейчас многие страны осваивают Е-диапазон с целью создания беспроводных систем связи типа "точка-точка", работающих в коротковолновой части миллиметрового диапазона.

Е-диапазон состоит из двух частотных полос 71–76 и 81–86 ГГц (рисунок 1.1). Такое распределение частот имеет свои достоинства. Во-первых, суммарный спектр, равный 10 ГГц, значительно больше любого другого спектра частот, используемого в настоящее время для связи. Он в 50 раз больше спектра всех видов сотовой связи, принятого в США, и значительно превышает все связные СВЧ-диапазоны. Такой большой охват частот способен обеспечить работу целого поколения новых систем беспроводной связи.

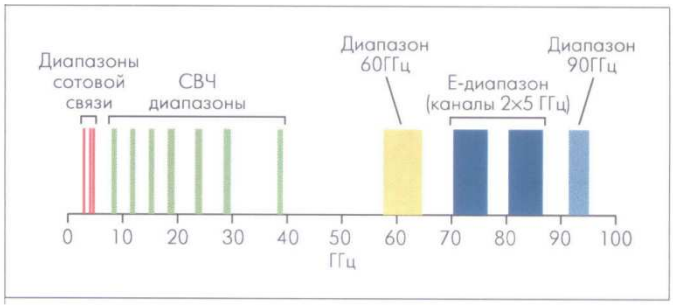

Рисунок 1.1. Основные частотные диапазоны беспроводной связи (США)

Во-вторых, распределение частот Е-диапазона, включающего два канала по 5 ГГц, дальше не дробится, как в случае более низкочастотных СВЧ-диапазонов. К примеру, в США Федеральная комиссия по связи делит каждый частотный диапазон с общей несущей на отдельные каналы с полосой не более 50 МГц. Такая ширина канала, в конечном счете, ограничивает объем данных, которые он способен пропустить. Е-диапазон достаточен для передачи данных с высокой скоростью (1 Гбит/с) с применением простейших схем

модуляции, например двоичной фазовой манипуляции (BPSK). При более сложных схемах модуляции скорость передачи в полнодуплексном режиме может достигать 10 Гбит/с.

Поскольку, в отличие от передачи данных по узкому каналу, необходимость сжатия данных отсутствует, вся архитектура системы может быть относительно простой. Она может быть построена с использованием модемов с модуляцией низкого порядка, нелинейных усилителей мощности, приемников с прямым преобразованием и многих других несложных компонентов. Это позволяет снизить стоимость системы, не ухудшая ее надежность и параметры.

Характеристики поглощения радиоволн в атмосфере в зависимости от частотного диапазона представлены на рисунке 1.2. В СВЧ-диапазонах до 38 ГГц атмосферное затухание не превышает 0,3 дБ/км. За некоторым подъемом в районе 23 ГГц следует сильное затухание на 60 ГГц, обусловленное поглощением радиоволн парами воды и молекулами кислорода. На частоте 60 ГГц ослабление достигает 15 дБ/км, что существенно ограничивает дальность передачи радиоволн. На частотах выше 100 ГГц начинают сказываться другие эффекты молекулярного поглощения, ограничивающие эффективность распространения сигналов.

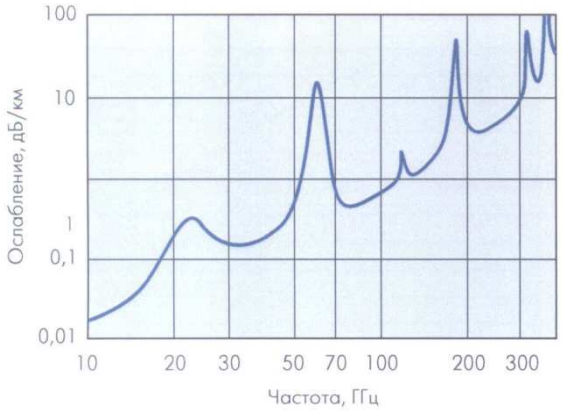

Рисунок 1.2. Характеристики поглощения радиоволн в атмосфере (на уровне моря)

Относительно "чистое" окно лежит в спектре частот 70–100 ГГц. Здесь атмосферное затухание составляет ~0,5 дБ/км, что близко к значениям затухания в традиционных СВЧ-диапазонах. В результате для беспроводных систем появляется возможность передачи сигналов на расстояния до несколько километров.

Влияние дождя. На частотах, превышающих 10 ГГц, дождь ограничивает дальность передачи (Рисунок 1.3). В случае сильного дождя (интенсивность 25 мм/ч) затухание сигнала в E-диапазоне достигает 10 дБ/км. Международным союзом по телекоммуникациям ITU на основании многолетних наблюдений составлены карты однотипных зон выпадения осадков в различных районах мира. Эти карты помогают проектировщикам при установке

систем связи в различных регионах мира учитывать интенсивность и годовую норму осадков в них.

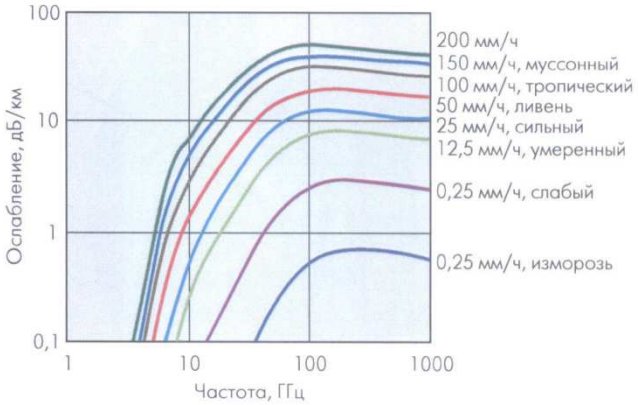

Рисунок 1.3. Затухание радиоволн, вызываемое дождем различной интенсивности

Влияние тумана и облачности. Одно из достоинств беспроводной связи на частотах Е-диапазона – слабая зависимость от тумана и облачности. При плотности густого тумана около 0,1 г/м3 с видимостью 50 м ослабление сигнала составляет всего лишь 0,4 дБ/км. Такое малое затухание объясняется тем, что размеры частиц тумана значительно меньше длины волны распространяемого сигнала, равной ~4-5 мм, и в результате они не вызывают сильного рассеяния радиоволн. Противоположная ситуация возникает при высокоскоростной оптической передаче информации в свободном пространстве, которая может рассматриваться как альтернатива беспроводной связи в Е-диапазоне. Затухание сигнала при оптической передаче в условиях сильного тумана может достигать 200 дБ/км.

Влияние пыли, песка и других мелких частиц. Размеры таких частиц также существенно меньше 4 мм, и они практически "невидимы" для беспроводных систем Е-диапазона.

Слабая загруженность миллиметрового частотного диапазона, возможность выделения широких полос частот (до 7 ГГц), упрощенная процедура выделения частот во всех странах мира делает этот диапазон уникальным для построения персональных, локальных и городских транспортных беспроводных сетей, а также каналов «точка-точка» (радиорелейных линий). Другими преимуществами систем передачи информации в этом диапазоне являются:

- сверхвысокая скорость беспроводной передачи мультимедийной информации – до 10 Мбит/с;

- возможность создания миниатюрных антенных систем, вплоть до интегрированных в чипсет антенных фазированных решеток. При этом для достижения узкой диаграммы

направленности (т.е. для большего усиления антенны) требуются меньшие габариты самих антенн;

- свойственное данному диапазону быстрое затухание радиоволн устраняет проблему интерференции различных источников сигнала, что позволяет автоматически решить проблему повторного использования частот (частотного планирования);

- при реализации систем связи возможны разнообразные схемы скремблирования, помехоустойчивого кодирования, простые схемы модуляции и множественного доступа;

- в системах Е-диапазона комиссия FCC США установила разрешенный уровень выходной мощности до 3 Вт что значительно больше, чем для других диапазонов миллиметровых волн;

- каналы Е-диапазона с полосой 5 ГГц допускают высокоскоростную передачу данных с использованием схем модуляции низкого уровня. Так, схемы с частотной манипуляцией (FSK) или двоичной фазовой манипуляцией легко обеспечивают передачу данных со скоростью до 2 Гбит/с. Поскольку простые схемы модуляции не накладывают дополнительных требований на линейность, то усилители мощности передатчика могут работать в режиме максимальной выходной мощности. А большая выходная мощность наряду с высоким коэффициентом усиления антенны обеспечивает высокую излучаемую мощность, что позволяет компенсировать возможные потери передачи и делает системы Е-диапазона сравнимыми по характеристикам с СВЧ-системами связи "точка-точка";

- возможность создания систем связи обеспечивающих: скрытность связи (необнаруживаемость); целостность (стойкость к прицельным помехам и несанкционированному подключению).

1.2.3. Резервирование лазерного канала широкополосным беспроводным каналом IEEE 802.11n

Стандарт IEEE 802.11n предназначен для дальнейшего расширения диапазона скоростей передачи данных — до 300 Мбит/с и выше. В целом же он основывается стандарте (дополнении) IEEE 802.11a, поскольку именно в нем описана технология OFDM. Увеличение скорости передачи данных в стандарте IEEE 802.11n базируется на двух физических принципах — удвоении полосы пропускания канала, с 20 до 40 МГц, и введении дополнительных антенных каналов приема-передачи (технология многоканальных антенных систем MIMO).

Работы по созданию стандарта IEEE 802.11n официально начались 11 сентября 2002 года, через год образовалась целевая группа TGn.

В январе 2006 года на регулярной конференции на Гавайях были утверждены основные документы (описания физического и MAC-уровней нового стандарта), которые вошли в предварительный (draft) стандарт IEEE 802.11n. Лишь в конце 2009 года этот стандарт был утвержден. Но производители окончательного его согласования дожидаться не стали, приступив к выпуску элементной базы и оборудования.

Отличия физического уровня стандарта IEEE 802.11n

Стандарт IEEE 802.11n допускает как стандартные каналы с шириной полосы 20 МГц (как и всех предшествующих стандартов IEEE 802.11, включая IEEE 802.11a), так и расширенные до 40 МГц. Поскольку каналы шириной 40 МГц приемлемы не для всех стран, противореча национальной политике распределения частотных ресурсов, то их применение — это опциональная (необязательная) возможность.

Стандарт IEEE 802.11 предусматривает поддержку как традиционных режимов передачи (как в IEEE 802.11a), так и режимов с высокой пропускной способностью (HT — High Throughput). В традиционных (L — Legacy) режимах число поднесущих не изменено. В HT-режимах оно увеличено: в 20-МГц канале их 56, из них 52 — информационные и 4 пилотные. Только из-за этого скорость возрастает на 8%. Еще один фактор увеличения пропускной способности — повышение допустимой скорости кодирования до 5/6 (т.е. каждые 5 бит исходной последовательности превращаются в 6 бит кодированной). Опционально предусмотрена возможность двукратного сокращения длительности защитных интервалов GI в OFDM-символах — с 0,8 до 0,4 мкс. В результате скорость возрастает до 65 и 72,2 (опционально) Мбит/с.

Режим 20 МГц — обязательный, для него установлен базовый набор скоростей (табл. 1). В 40-МГц каналах поднесущих 114, из них 108 информационных и 6 пилотных. Один лишь этот фактор увеличивает пропускную способность канала на 125%.

Отметим, что традиционный режим также позволяет увеличивать (удваивать) скорость передачи данных. Однако это происходит при непосредственном удвоении полосы пропускания (40 МГц) — фактически передача ведется на двух смежных каналах IEEE 802.Па, используются 52x2 = 104 поднесущие (из 128 номинальных поднесущих не задействованы частоты с индексами от —5 по 5).

Таблица 1.1. Базовый набор скоростей проекта IEEE 802.11n

Модуляция	Скорость кодирования	Число битов на поднесущую	Кодированных битов на символ	Информационных битов на символ	Скорость передачи данных	
					GI = 0,8 мкс	GI = 0,4 мкс

BPSK	1/2	1	52	26	6,5	7,2
QPSK	1/2	2	104	52	13,0	14,4
QPSK	3/4	2	104	78	19,5	21,7
16-QAM	1/2	4	208	104	26,0	28,9
16-QAM	3/4	4	208	156	39,0	43,3
64-QAM	2/3	6	312	208	52,0	57,8
64-QAM	3/4	6	312	234	58,5	65,0
64-QAM	5/6	6	312	260	65,0	72,2

Основное отличие стандарта IEEE 802.11n от его предшественников — появление нескольких антенных каналов в приемнике и передатчике. Обязательный режим подразумевает поддержку двух антенных каналов оборудованием точек доступа (AP) и одного канала — пользовательскими (терминальными) станциями. Всего и у AP, и у терминальной станции может быть до четырех антенных каналов приема-передачи.

Поскольку стандартом IEEE 802.11n предусмотрена технология MIMO, изменяется структурная схема передающего и приемного устройств (Рисунок 1.4). Данные после скремблирования поступают на сверточный кодер (как и в IEEE 802.11a). Если скорость передачи данных превышает 300 Мбит/с, используются два сверточных кодера. В отличие от IEEE 802.11a, поддерживается скорость кодирования 5/6. Кроме того, опционально вместо двоичного сверточного кодера (BCC) предусмотрено применение блокового кодера LDPCC (Low density parity check codes).

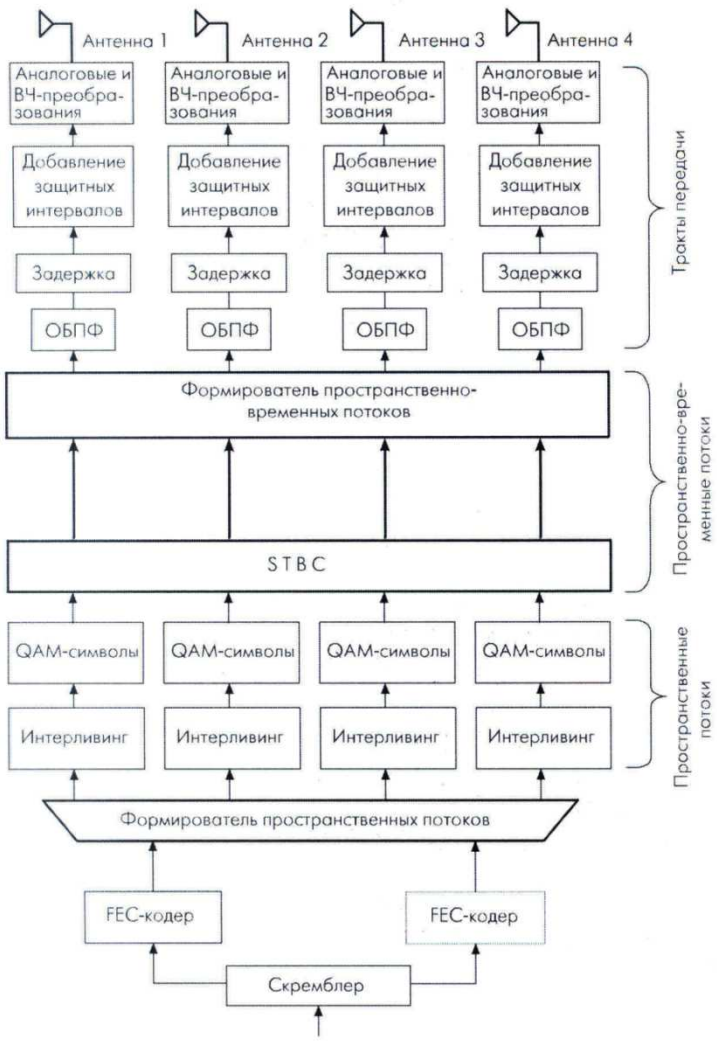

Рисунок 1.4. Структура аппаратуры передачи стандарта IEEE 802.11n

Дальше различия более серьезные. Кодированный поток битов разбивается на так называемые пространственные (пространственно-разделенные) потоки (spatial streams). Число таких потоков N_{SS} не может быть меньше, чем число антенных каналов в передатчике N_{TX}. Предусмотренный алгоритм распределения по потокам прост — входная последовательность разбивается на группы длиной

$$S = \sum_{i^{SS}=0}^{N_{SS-1}} s(i_{SS}),$$

где $s(i^{SS}) = \max(1, N_{BPSC}(i^{SS})/2)$ — число битов, определяющих действительную или мнимую составляющую комплексного модуляционного символа на одной поднесущей, $N_{BPSC}(i^{SS})$ — число битов на поднесущую в одном OFDM-символе. Если в каждом

пространственном потоке используется одинаковая схема мультиплексирования, то $S = N_{SS} \cdot \max(1, N_{BPSC}/2)$.

Группы длиной S последовательно (по кругу) распределяются между N_{SS} пространственных потоков. Далее в каждом потоке происходит перемежение битов, аналогично IEEE 802.11a (на первой стадии для перестановок применяется таблица размером 13 строк на $4 N_{BPSC}$ столбцов для 20-МГц канала и 18 x $4 N_{BPSC}$ — для 40-МГц канала). Если использовано более одного пространственного потока, появляется третья стадия перемежения — частотная ротация. Она описывается выражением:

$$r = \{j - [2 i^{SS} \bmod 3 + 3 \bullet \mathrm{floor}(i^{SS}/3)] \bullet N_{rot} \bullet N_{BPSC}\} \bullet N_{CBPS},$$

где j — индекс бита после второй стадии перестановок; i^{SS} — номер пространственного канала. Коэффициент N_{rot} принимает значения 11 и 29 для 20-и 40-МГц каналов соответственно.

Применение технологии MIMO преследует две цели — повышение надежности приема/передачи и обеспечение связи по пространственно разделенным каналам (SDM — Spatial Division Multiplexing). В первом случае используется так называемый пространственно-временной блоковый код (STBC — Space Time Block Code), повышение скорости передачи происходит за счет сокращения проверочных последовательностей и уменьшения защитных интервалов. При SDM скорость увеличивается благодаря распараллеливанию потоков транслируемых данных.

Пространственно-временное кодирование подразумевает преобразование одного потока OFDM-символов d_i, в два пространственно-временных потока (Таблица 1.2, символ * означает комплексное сопряжение: если $x = a + jb$, то $x^* = a — jb$). Поэтому в системах IEEE 802.11n число пространственно-временных N_{STS} должно превышать N_{SS} - Возможны различные сочетания значений N_{STS} и N_{SS}, лишь бы $N_{STS} > N_{SS}$.

Таблица 1.2. Пространственно-временное кодирование

	Интервал 1	Интервал 2
Канал 1	d_{2n}	d_{2n+1}
Канал 2	$-d^*_{2n+1}$	d^*_{2n}

После стадии формирования пространственно-временных потоков (если STBC не используется, можно считать, что пространственно-временной поток однозначно соответствует пространственному потоку, между $N_{STS} = N_{SS}$) происходит их распределение по антенным каналам. Стандарт IEEE 802.11n предусматривает несколько схем такого распределения. Наиболее простая — прямое назначение (direct mapping) пространственного потока антенному каналу с одинаковыми номерами, при этом число антенных каналов передатчика $N_{TX} = N_{STS}$.

Если $N_{TX} > N_{STS}$, используются различные схемы пространственного расширения, которые математически описывает выражение:

$$r = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \end{bmatrix} = [Q] \times x = [Q] \times \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix},$$

где r — вектор символов, передаваемых в антенных каналах (длиной N_{TX}); x — вектор символов в пространственно-временных каналах длиной N_{STS}; Q — матрица с N_{TX} строками и N_{STS} столбцами. В схеме прямого назначения Q — диагональная единичная матрица.

В случае двух пространственно-временных потоков и трех антенных трактов первый поток может передаваться через первый и третий антенные тракты,

т.е. $Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$, при $N_{TX} = 3$ и $N_{STS} = 1$ $Q = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$. Отметим, что столбцы в матрицах Q должны быть ортогональными (например, на основе матриц Адамара).

Предусмотрен и режим, когда матрица Q принимает различные значения для каждой поднесущей *k:* в рассмотренном случае $N_{TX} = 3$ и $N_{STS} = 2$;

В антенных каналах 2, 3 и 4 информация передается с временной задержкой (относительно канала 1) в 400, 200 и 600 нс соответственно. Такой фазовый сдвиг необходим, чтобы избежать непроизвольного формирования стабильной диаграммы направленности передающей антенной системы, а это может произойти, например, при синфазном или противофазном излучении.

Однако в стандарте IEEE 802.11n предусмотрен и так называемый режим формирования луча (beamforming). В этом режиме матрица Q формируется передатчиком на основе информации о состоянии канала связи между ним и выбранным приемником.

Вектор принятого приемником совокупного по всем антенным каналам сигнала можно записать как $y = [y_1,....,y_{RX}]^T$. Вектор передаваемого сигнала $r = [r_1,...,r_{TX}]^T$. Тогда $y = H \times r + n$, где n — вектор шума в канале; H — матрица (размерности N_{RX}, N_{TX}) состояния канала. Поскольку $r = Q \times x$, *то* $y = H \times Q \times x + n$.

Следовательно, для компенсации задержек и затуханий в канале, описываемых матрицей *H*, необходимо вычислить и применить соответствующую матрицу *Q*. Для этого приемник вычисляет и транслирует передатчику либо матрицу состояния канала *H*, либо уже подготовленные матрицы *Q*. В качестве тестовой последовательности (заранее известной передатчику) выступают преамбулы пакетов физического уровня (точнее — длинные подстрочные последовательности режима HT, HT-LTF) либо специальные тестовые пакеты «прослушивания» канала, включая пакеты прослушивания без поля данных.

Стандарт IEEE 802.11n на физическом уровне предусматривает три структуры кадров — традиционную (совпадающую с IEEE 802.11a/g), смешанную и так называемое Зеленое поле (Green Field) (рис. 5). Эти структуры соответствуют одноименным режимам работы. Последние два из них называют скоростными (HT).

Смешанный режим (MM — mixed mode) предназначен для совместимости сетей IEEE 802.11a/g и IEEE 802.11n — традиционные устройства распознают присутствие своих высокоскоростных собратьев и определяют режим их передачи (например, длительность захвата канала), что позволяет предотвратить коллизии, особенно в случае скрытых станций. Для этого в структуре пакетов типа MM присутствуют как традиционные поля — короткая и длинная подстроенные последовательности (L-STF и L-LTF) и заголовок SIGNAL (L-SIG), так и поля, необходимые для HT-режима. К последним относятся управляющее поле HT-SIGNAL (HT-SIG), а также короткая и длинные подстроенные последовательности (HT-STF и HT-LTF). Временная задержка между каналами добавляется именно перед HT-полями.

Режим Зеленого поля (GF) (точнее — чистого, незагрязненного поля) позволяет передавать данные наиболее эффективно. В GF-кадрах присутствуют только HT-поля, и традиционные приемники IEEE 802.11 такие посылки не воспримут. Поэтому данный режим опционален и может использоваться, только если все станции сети поддерживают IEEE 802.11n.

Управляющее поле HT-SIGNAL состоит из двух частей по 24 бит каждая. Эти части кодируются (со скоростью 1/2), подвергаются перемежению и прочей обработке, как и в случае IEEE 802.11a. Поднесущие модулируются посредством BPSK, только

модуляционные символы смещены на 90° относительно традиционного случая (приведенного на Рисунке 1.5), т.е. на диаграмме Грея значения битов —HT-SIGNAL занимает два OFDM-символа.

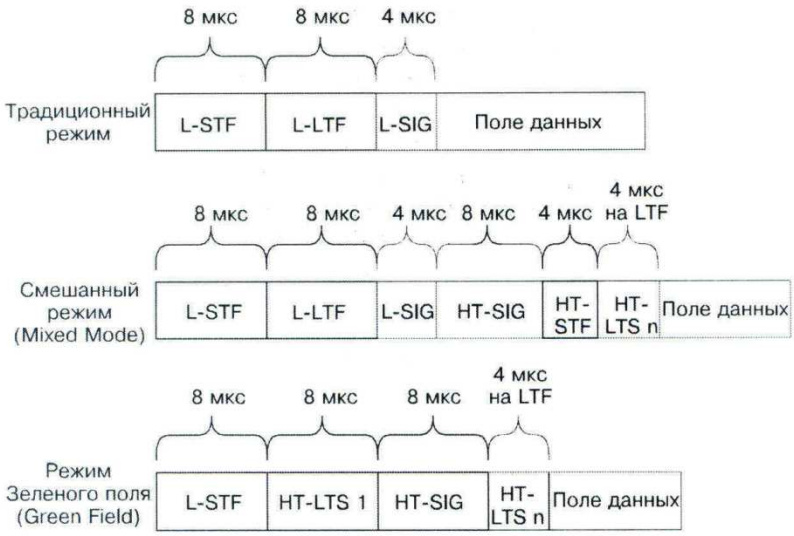

Рисунок 1.5. Пакеты физического уровня стандарта IEEE 802.11n

Информация, передаваемая в HT-SIGNAL, — номер схемы кодирования/модуляции (MCS), признак ширины канала (20/40 МГц), длина поля данных, признак оценки канала smoothing (интегральная или на каждой поднесущей отдельно), признак пакетов прослушивания канала (sounding), признак объединения MAC-пакетов (aggregation), номер схемы STBC-кодирования, указатель типа кодирования (BCC/LDPCC), признак короткого защитного интервала в OFDM-символах (short GI), число дополнительных длинных подстроенных последовательностей (N HT-LTF), контрольная сумма CRC и разграничительные 6 бит (Tail) (Рисунок 1.6).

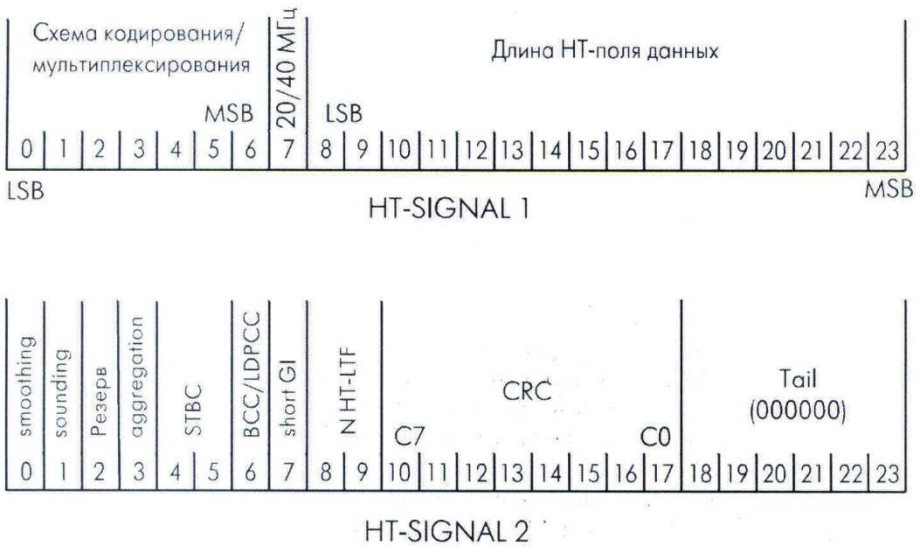

Рисунок 1.6. Поле SIGNAL заголовка пакета физического уровня стандарта IEEE 802.11n

Короткая подстроенная последовательность аналогична традиционной (с поправкой на число используемых поднесущих). Длинные подстроенные последовательности служат для оценки каналов передачи (для каждого антенного тракта), поэтому их число не может быть меньше, чем число прстранственно-временных потоков NSTS. Кроме того, HT-LTF — это механизм прослушивания канала, поэтому в кадре может быть больше HT-LTF, чем необходимо для передачи поля данных именно этого кадра (т. е. больше, чем в данный момент используется пространственно-временных каналов). Эти дополнительные последовательности предназначены для оценки каналов, которые передатчик предполагает использовать. Физически вышесказанное означает, что если данные в кадре передаются, например, через антенные тракты 1 и 2, то в них используют длинные подстроенные последовательности HT-LTF1 и HT-LTF2, а одновременно в незадействованных антенных трактах 3 и 4 могут транслироваться последовательности HT-LTF3 и HT-LTF4 для оценки соответствующих каналов. Длительность HT-LTF — 4 мкс, в режиме GF первая HT-LTF вдвое длиннее.

В результате применения дополнительных антенных трактов, а также 20-и 40-МГц каналов число возможных скоростей передачи и соответствующих им схем модуляции/кодирования существенно возрастает по отношению к базовому набору. Причем возможны как симметричные схемы модуляции (одинаковые в каждом пространственном потоке), так и несимметричные (вид модуляции в каждом потоке различен). Проект описывает по 32 симметричные схемы для 20- и 40-МГц каналов (для HT-режимов) и по 44 асимметричные схемы. В результате для 20-МГц каналов предусмотрены скорости до 288,9 и 600 Мбит/с — для 40-МГц каналов.

Агрегирование пакетов на MAC-уровне

Повышение скорости передачи возможно не только за счет изменений на физическом уровне. MAC-уровень в проекте IEEE 802.lln также модернизирован. Одна из важнейших особенностей IEEE 802.lln — возможность объединения (агрегирования) нескольких MAC-пакетов (MPDU) в один пакет физического уровня PSDU (A-MPDU) (рис.7). У такого объединенного пакета может быть только один адрес получателя. При этом повышается скорость передачи данных, поскольку сокращается удельный объем служебной информации (заголовки и преамбулы пакетов физического уровня). Объединение пакетов — это обязательное требование, и только те MPDU, которые требуют индивидуального подтверждения приема (Аск), могут передаваться как отдельные пакеты. Более того, один MPDU может агрегировать несколько пакетов MSDU (MAC service data

unit), принадлежащих различным сервисным потокам (различным приложениям) и обладающих различными требованиями к качеству предоставления услуг (QoS), лишь бы у них был единый адрес приемника. В результате формируется объединенный MAC-пакет A-MSDU (см. Рисунок 1.7).

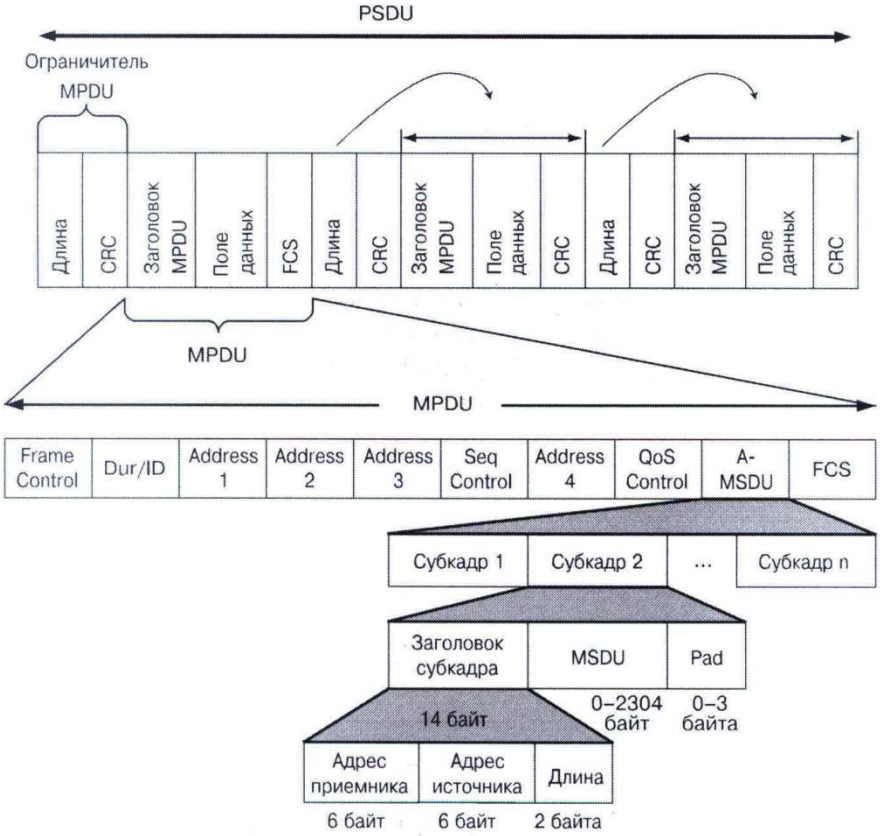

Рисунок 1.7. Интегрированные заголовки MAC-уровня стандарта IEEE802.11n

Для подтверждения приема пакетов физического уровня PSDU используется специальный пакет блочного подтверждения (Block Acknowledge — BA), описанный в стандарте IEEE 802.Не (посвящен обеспечению QoS). Однако в IEEE 802.11n применяют «сжатые» В А — в этом пакете предусмотренное стандартом IEEE 802. Не поле подтверждения размером 128 байт сокращено до 8 байт, причем каждый бит в этом поле подтверждает прием отдельного MSDU (Рисунок 1.8). Более того, необходимый запрос подтверждения (отдельный пакет BAR — BA request) может не использоваться, вместо этого достаточно задать определенный тип политики подтверждений. По утверждениям разработчиков, приведенный на Рисунке 1.6 механизм обмена (объединенный пакет и блок подтверждения) более чем в 2,5 раза эффективнее, чем традиционный «данные-подтверждение».

Важная особенность проекта IEEE 802.11n — режим PSMP (Power Save Multi-Poll) — энергосберегающий множественный опрос. Он похож на стандартный режим централизованного распределения ресурсов PCF — управляющая станция AP транслирует

специальный управляющий пакет PSMP, в котором для каждой станции (из тех, которым разрешен режим PSMP) назначается время и длительность приема и передачи (нисходящего и восходящего соединений) в интервале обслуживания (цикле повторения приема-передачи). Причем длительность интервала обслуживания для каждой станции может быть различной. Для подтверждения приема в режиме PSMP используются специальные пакеты подтверждения (МТБА), следующие немедленно за переданными агрегированными пакетами данных. Электроэнергия экономится благодаря тому, что станции знают, когда им необходимо активизироваться, и могут выключать свои энергоемкие блоки на время бездействия.

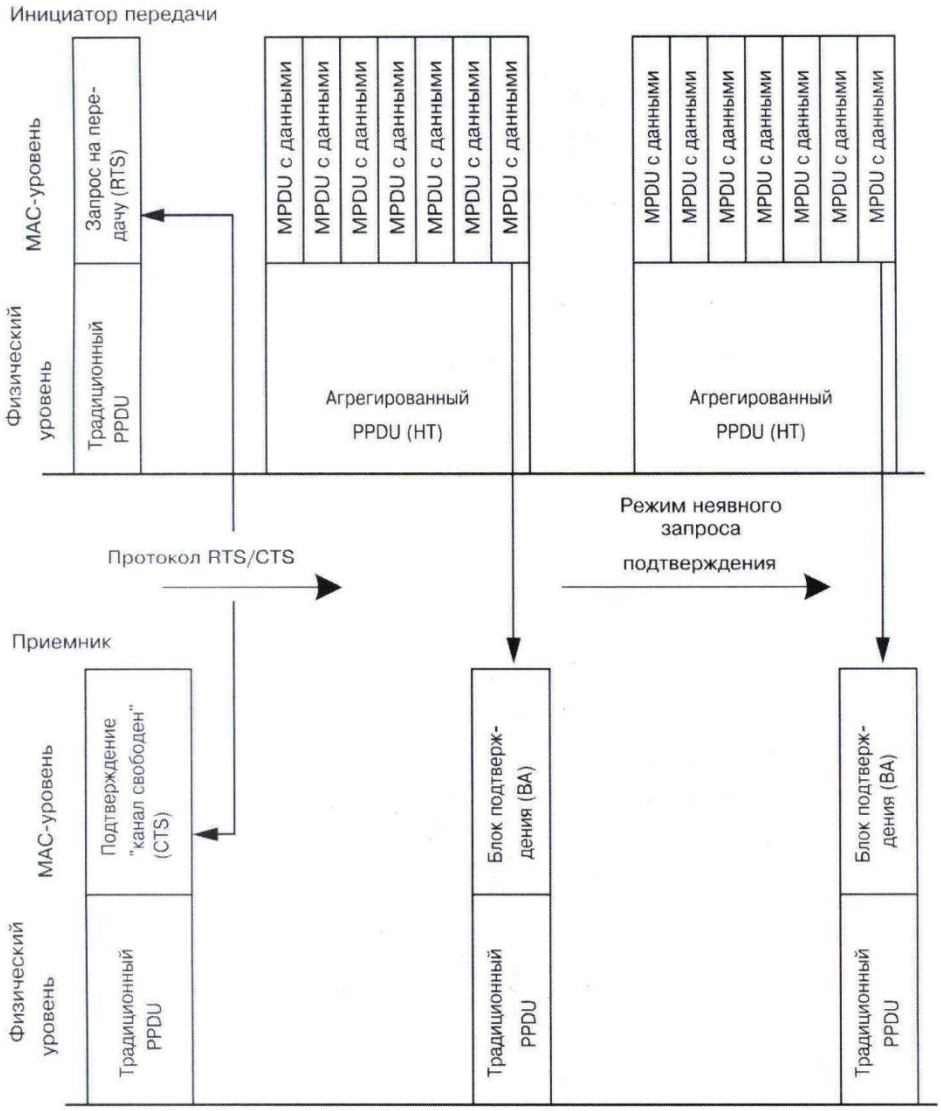

Рисунок.1.8. Передача посредством агрегированных пакетов и блоков подтверждений

Особенность данного режима — его гибкость. В рамках одного цикла PSMP управляющая станция может передавать дополнительные пакеты PSMP (sub-PSMP) — это режим мультифазного PSMP. В чем его удобство? Например, какая-либо станция не успела

передать данные в отведенный для нее интервал (Рисунке 1.9). Тогда в конце этого интервала она посылает AP специальный пакет (запрос RR) с указанием необходимых этой станции дополнительных ресурсов. Если есть возможность, AP отправляет в ответ пакет sub-PSMP, в котором данной станции выделен дополнительный интервал передачи. Другой случай — потеря данных. Если передающая станция не получила подтверждения приема, AP также может предоставить ей дополнительные ресурсы для повторной передачи посредством sub-PSMP.

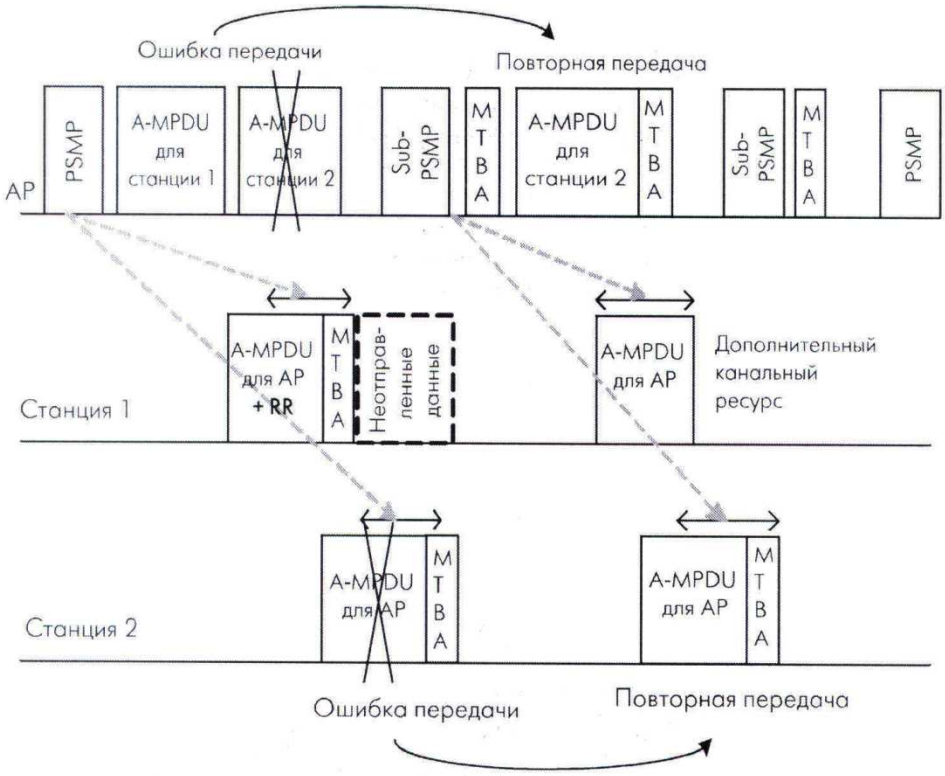

Рисунок 1.9. Выделение дополнительного окна передачи для досылки информации и повторной отправки данных в режиме мультифазового PSMP

Не менее интересная особенность IEEE 802.11n — режим изменения направления обмена соединения. Пусть станция А передает данные станции Б. Оставаясь в рамках того же соединения, т. е. без дополнительных процедур доступа к каналу, возможно изменить направление передачи — от станции Б к станции А, а затем вновь передать права трансляции станции А.

Разумеется, помимо перечисленных особенностей, MAC-протокол проекта IEEE 802.11n включает поддержку всех изменений физического уровня. Он определяет специальные форматы пакетов калибровки канала передачи, выбора антенн, измерения характеристик канала и передачи матриц параметров канала, формирования диаграмм направленности и т. п. Предусмотрено применение сокращенных до 2 мкс межкадровых интервалов (RIFS) и т. д.

Элементная база для 802.11n

Производители элементной базы и аппаратуры уже выпускают Wi-Fi-продукты с отдельными возможностями IEEE 802.11n. Едва ли не первой в этом направлении выступила компания Airgo Networks (www.airgonetworks.com), выпускающая чипсет AGN300 для поддержки MIMO-опции в стандартах IEEE 802.11 a/b/g (прообраз 802.11n). В состав чипсета входят однокристальный MAC- и baseband-процессор (AGN303BB) и два однокристальных двухдиапазонных (2,4/5 ГГц) трансивера (AGN301RF и AGN302RF).

Одним из первых производителей пред-802.11п чипсетов стала и израильская фирма Metalink Broadband (www.MetalinkBB.com), выпустившая чипсет WLANPlus в составе сдвоенного трансивера MtW8150 и MAC- и baseband-процессора MtW8170. В MtW8150 на одном кристалле интегрированы два цифровых трансивера для частотного диапазона 4,9-5,9 ГГц с полосой пропускания 20/40 МГц. Трансиверы используют принцип прямого преобразования (т.е. с нулевой промежуточной частотой), а потому не нуждаются во внешних ПАВ-фильтрах. Поддержана квадратурная модуляция, вплоть до 64-QAM. MtW8150 можно каскадировать для поддержки систем более чем с двумя антенными каналами (например, 4 x 4). Чип размером 11x11 мм выполнен по Si-Ge-технологии, напряжение питания 3 В.

СБИС MtW8170 поддерживает физический и MAC-уровни системы связи. Она обеспечивает обратную совместимость с IEEE 802.11a, а также скорости передачи данных до 243 и 135 Мбит/с в 40- и 20-МГц каналах соответственно. Одной СБИС MtW8170 достаточно для поддержки MIMO-конфигураций 2 x 2 и 2 x 3.

Кроме упомянутых компаний, к производству чипсетов для поддержки будущего стандарта IEEE 802.11n приступили такие фирмы, как Atheros Communications (чипсет AR5008) и Broadcom (чипсет INTENSI-FI). В состав последнего входит MAC- и baseband-процессор BCM4321 и трансивер BCM2055, предназначенные для работы в диапазонах 2,4-2,5 и 4,9-5,85 ГГц.

1.3. Исследование состояния и перспектив развития аппаратно-программных средств гибридных каналов передачи мультимедийной информации на базе радио и лазерных технологий

В настоящее время рассматривают два основных варианта построения гибридных систем связи, в которых основной линией передачи данных является атмосферный лазерный канал. Первый подход заключается в использовании резервного радиоканала с несущей частотой в диапазоне 2.3-6.4 Ггц. Обычно такой резервный канал работает на основе технологии Wi-Fi. Поскольку устройства Wi-Fi очень широко распространены на

рынке, они достаточно дешевы, а, следовательно, стоимость гибридной системы в целом возрастает совсем незначительно по сравнению с системой АОЛС. Другим преимуществом такого резервного канала является безразличие к погодным условиям, что чрезвычайно важно для резервного канала, т.к. позволяет значительно увеличить надежность гибридного канала в целом. Однако поскольку такой резервный канал использует относительно невысокую несущую частоту, то радиоканал имеет гораздо меньшую пропускную способность, по сравнению с атмосферным лазерным каналом. Таким образом, первый подход позволяет достичь операторского класса надежности, но со снижением пропускной способности при переходе на резервный канал. Исследованию гибридных систем, в которых основным каналом является лазерный атмосферный канал, а резервным Wi-Fi, посвящен целый ряд работ. Основная проблема, возникающая в таких гибридных системах, заключается в выборе оптимального алгоритма переключения между основным каналом связи и резервным.

Во втором подходе в качестве резервного канала предлагается использовать радиоканал в миллиметровом диапазоне. Это позволяет достичь пропускных способностей для резервного канала сравнимых с основным каналом, т.е. с атмосферным лазерным каналом. В тоже время высокочастотный радиоканал также подвержен влиянию неблагоприятных погодных условий, в основном дождя. Однако, как уже отмечалось выше, туман вызывает совсем незначительное затухание в таком радиоканале.

Для отдельно взятой системы АОЛС туман может вызывать затухания вплоть до 120-130 дБ/км, тогда как в грозу при интенсивности осадков в 150 мм/ч коэффициент затухание достигает всего 25 дБ/км, что значительно меньше по сравнению с туманом. Для радиоканала в миллиметровом диапазоне дождь с такой же интенсивностью может вызывать затухание до 50 дБ/км. В тоже время туман практически не оказывает никакого влияния на такой радиоканал. Затухание, вызванное повышенной влажностью, не превышает 5 дБ/км. Таким образом, для достижения высокого уровня доступности необходим значительный запас мощности линии связи. Это условие ограничивает применение систем АОЛС на расстояниях до 0,7 км. Для миллиметрового радиоканала увеличение расстояния требует увеличение выходной мощности радиопередатчика. В гибридных системах проблема затухания может быть рассмотрена в следующем контексте: системе АОЛС необходимо преодолеть только затухание вызванное дождем, а радиоканалу в миллиметровом диапазоне необходимо преодолеть затухание, связанное с повышенной влажностью. Это позволяет устранить требования на большой полный запас мощности и небольшое расстояние для обеих систем. Так измерения показали [16], что при длине канала в 2,7 км суммарные потери мощности составили 20 дБ, а удельная потеря мощности

равна 7 дБ/км для АОЛС системы. Для миллиметрового радиоканала при такой же длине канала в 2,7 км полная потеря мощности составила 7 дБ, а удельная 2,6 дБ/км. Эти данные были получены при хороших погодных условиях, т.е. при чистом ясном небе.

Увеличение коэффициента затухания, вызванное туманом, для оптических линий обычно не превышает 6 дБ/км за секунду. Это означает, что коэффициент затухания достаточно стабилен, аналогично коэффициенту затухания вызванного дождем для миллиметровых радиоканалов. Однако при большой скорости ветра и сильном тумане или низкой облачности эти значения могут сильно отличаться. Данные эксперимента, проведенного в работе [16], показывают, что объединив две системы с низким коэффициентом доступности в 97%, но зато достаточно дешевые, полная доступность гибридной системы может быть увеличена до 99.99%, что аналогично значительному увеличению мощности (на несколько дБ) передатчиков миллиметрового радиоканала.

Таким образом, на сегодняшний день нет гибридных систем с высокой пропускной способностью обеспечивающих операторский класс надежности на расстояниях до 4-х км. Создание подобной системы могло бы значительно удешевить, упростить и ускорить построение «последней мили», предоставление высокоскоростного доступа к магистральным сетям.

Неблагоприятные погодные условия, такие как дождь, снег, туман (а также песчаная пыль, городской смог и различные виды аэрозолей), могут значительно ухудшить видимость и таким образом снизить эффективный диапазон работы лазерных атмосферных линий связи. Так, затухание сигнала в оптическом канале при сильном тумане может доходить до критических 50-100 дБ/км. Поэтому, чтобы достичь операторских (или хотя бы близких к ним) значений надежности FSO-канала связи, необходимо прибегать к использованию гибридных решений.

Гибридное радио-оптическое оборудование основывается на использовании резервного радиоканала (это либо Wi-Fi, либо радиорелейная линия) в связке с оптическим каналом. Основное достоинство такого решения в том, что это высокоскоростные беспроводные системы операторского класса, надежно функционирующие в любых погодных условиях.

В Таблице 1.3 ниже приведены технические характеристики существующих на данный момент на рынке моделей зарубежного гибридного радио-оптического оборудования:

Таблица 1.3.

Производитель	Модель оборудования	Скорость	Скорость	Тип радио-	Макс.

		оптического канала	радио-канала	канала	рабочая дистанция
LightPointe	FlightStrata 100 XA	100 Мбит/с	72 Мбит/с	Wi-Fi (5.47 – 5.85 ГГц)	5000 м
MRV	TereScope Fusion	100 Мбит/с 1000 Мбит/с	10 – 20 Мбит/с	Wi-Fi (2.4 ГГц)	4000 м
CBL	AirLaser IP 100	125 Мбит/с	4.5 Мбит/с	Информация отсутствует	2000 м
AirLinx	UniFSO100/155	100 Мбит/с 155 Мбит/с	10 – 20 Мбит/с	Wi-Fi	3000 м

Следует отметить, что использование резервного оборудования миллиметрового радиодиапазона приводит к сокращению максимальной рабочей дистанции (до 2000 м) и резкому повышению стоимости (почти в два раза дороже обычного FSO-решения). При этом само оборудование гибридного канала связи представляет собой два раздельных устройства (отдельно оптический блок, и отдельно – радиорелейный), что усложняет монтаж всей системы.

Остальные же модели гибридного канала имеют относительно невысокую скорость радиоканала, недостаточную для резервирования основного оптического канала (тем более гигабитного), что делает проблематичным использование данного оборудования требовательными операторами связи.

1.4. Выбор оптимальных параметров протокола передачи информации, обеспечивающих максимальную производительность канала передачи мультимедийной информации

На основе сформулированных ранее достоинств, недостатков и характеристик лазерного и радиооборудования, а так же перспективных направлений развития последних, выделим перечень параметров, определяющих качество функционирования беспроводных телекоммуникационных средств передачи мультимедийной информации, и сформулируем требования к гибридному каналу связи.

Из наиболее значимых для пользователя критериев качества работоспособности каналов передачи данных целесообразно выделить следующие:

- надежность (доступность);
- скорость передачи данных;
- пропускная способность канала связи;
- производительность;
- среднее и максимальное время реакции;
- дальность связи;

– время монтажа (установки).

Дадим краткую характеристику каждого из перечисленных критериев.

Одним из основных критериев качества каналов связи является доступность (надежность), которая характеризуется отношением времени работоспособности канала к общему интервалу наблюдения в процентах (реже в относительных единицах). Другими словами, доступность канала – это показатель того, насколько надежно работает канал. Данный параметр зависит от разнообразных факторов, включая надежность каналообразующего оборудования, но все они хорошо известны и предсказуемы. Самое большое неизвестное, для определенных длин волн электромагнитного излучения – ослабление сигнала в атмосфере. Хотя большинство аэропортов мира, метеорологических станций и пр. собирают статистику видимости (из которой можно получить коэффициенты затухания для заданного участка спектра электромагнитного излучения), пространственная точность таких измерений очень мала (обычно около 100 м), а время замеров слишком редко (обычно часы). В результате, оценки доступности 99.9 % или лучше получить затруднительно. Таким образом, базы данных аэропорта практически неприменимы для точного и надежного определения качества обслуживания. В результате, изготовители FSO (Free Space Optics) вынуждены сами собирать более надежные атмосферные данные, используя чувствительные приборы типа нефелометров, измерителей видимости и прозрачности атмосферной трассы.

Скорость передачи данных (битовая скорость) – скорость, с которой передается или принимается информация в двоичной форме. Пользователя, как правило, интересует скорость передачи цифровых данных, а не скорость передачи в канале, поэтому, в дальнейшем, под скоростью передачи данных будем подразумевать цифровую скорость передачи и пользоваться единицами измерения бит/с. Скорость передачи данных колеблется в очень широком диапазоне – от единиц Мбит/с до десятков Гбит/с. Конкретная цифра зависит от конструктивных особенностей системы.

Пропускная способность канала связи - максимальная скорость передачи данных от источника к получателю.

Максимальная эффективная производительность на уровне TCP – это максимальный объем данных, который может быть передан в секунду на уровне TCP. Производительность определяется двумя согласуемыми параметрами максимальная битовая скорость и средняя битовая скорость. По значению этой характеристики можно судить об эффективности технологии, используемой при построении Internet-канала, с учетом оптимальной настройки параметров активного сетевого оборудования.

Среднее и максимальное время реакции – это мера того, как быстро Internet-канал работает во время его непрерывной эксплуатации. Понятно, что высокая потенциальная производительность еще не является залогом хорошего качества Internet-канала. В процессе эксплуатации в канале могут возникать ошибки передачи данных (периоды недоступности) и ресурсы сети могут стать недоступны на некоторое время. В результате этого увеличиваются задержки передачи пакетов, увеличивается число повторных передач, и происходят другие явления, следствием которых является ухудшение качества Internet-канала.

Дальность связи – один из важных для пользователя параметров – расстояние между терминалами передачи данных.

Время установки – период времени, необходимый для монтажа и установления связи в канале передачи данных.

Перечисленные выше параметры являются определяющими и наиболее критичными при выборе беспроводных телекоммуникационных средств передачи мультимедийной информации, в связи с чем подлежат оптимизации, с целью разработки нового поколения широкополосных беспроводных телекоммуникационных средств на основе комбинированных приемопередатчиков, использующих лазерные и радиосредства, для построения телекоммуникационных сетей повышенной производительности и надежности.

Доступность гибридного канала связи $P_{Доступ}$ в случае коммутации оптического и радиоканалов передачи данных может быть определена как:

$$P_{Доступ} = P_{АОЛС} + \left(1 - P_{АОЛС}\right) \cdot \int_{0}^{+\infty} \left(1 - \frac{t_{реакц} + t_{ВКЛ.радио}}{x + T_{ВОСТ_АОЛС}}\right) \cdot W_{НД_АОЛС}\{x\}\, d\,x, \qquad (1.1)$$

где $P_{АОЛС}$ – вероятность доступности атмосферной оптической линии связи (АОЛС); $W_{НД_АОЛС}\{x\}$ – функция плотности вероятности случайной величины $x = T_{НД_АОЛС} \in (0;+\infty)$ – время недоступности АОЛС; $T_{ВОСТ_АОЛС}$ – время восстановления связи по АОЛС; $t_{ВКЛ.радио}$ – время вхождения радиооборудования в режим передачи данных; $t_{реакц}$ – время принятия решения на переход в режим работы радиоканала. В модели определения доступности (1) предполагается, что доступность радиоканала равна 100 %; надежность каналообразующего оборудования и прочие факторы, определяющие отсутствие связи по АОЛС или радиоканалу по причине отказа оборудования не учитываются. Параметры модели определения доступности (1.1) представлены на Рисунке 1.10, где $П_{АОЛС}$ и $П_{радио}$ – производительность при работе по АОЛС и радиоканалу соответственно; $П_{ГК}$ – производительность гибридного канала связи.

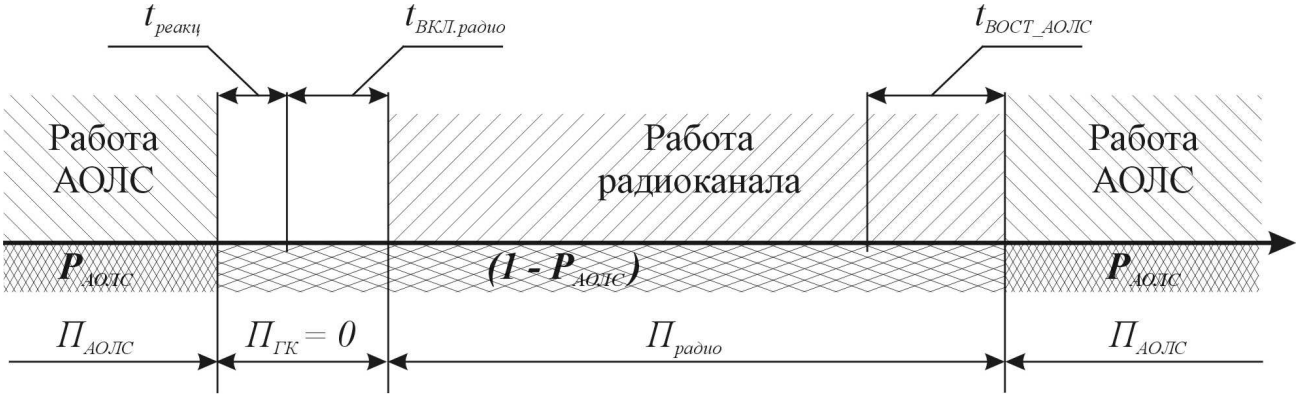

Рисунок 1.10. Временные и вероятностные параметры модели определения доступности гибридного канала

Производительность гибридного канала связи в случае коммутации оптического и радиоканалов передачи данных может быть определена как:

$$П_{ГК} = П_{АОЛС} \cdot P_{АОЛС} + П_{радио} \cdot (1 - P_{АОЛС}) \cdot \int_0^{+\infty} \left(1 - \frac{t_{реакц} + t_{ВКЛ.радио}}{x + T_{ВОСТ_АОЛС}}\right) \cdot W_{НД_АОЛС}\{x\}\, d\,x\,. \qquad (1.2)$$

С учетом различных критериев качества оптического и радиоканалов оптимизация доступности гибридного канала должна быть выполнена с учетом требований к производительности, времени реакции, дальности связи и прочим параметрам, определяющим качество функционирования беспроводных телекоммуникационных средств передачи мультимедийной информации. Для решения поставленной задачи необходимо выполнить многомерную оптимизацию параметров оптического и радиоканалом, а так же алгоритма их взаимной работы, с целью разработки гибридного беспроводного канала передачи мультимедийной информации нового поколения.

Таким образом, целесообразно использовать принцип оптимизации Парето, суть которого описана ниже.

Постановка задачи Парето оптимизации. Совокупность частных критериев оптимальности $\phi_1(X)$, $\phi_2(X)$, $\cdots$, $\phi_m(X)$ назовем векторным критерием оптимальности $\Phi(X)$:

$$\Phi(X) = (\phi_1(X),\ \ \phi_2(X),\ \ \cdots,\ \ \phi_m(X)). \qquad (1.3)$$

Положим, что ставится задача максимизации каждого из указанных критериев в одной и той же области допустимых значений $D_X \in T \cap D$, где $T = \{\, X \mid x_i^- \le x_i \le x_i^+\,,\ \ i \in [1, m] \,\}$ – «технологический» параллелепипед, $D = \{\, X \mid g_1(X) \ge 0\,,\ \cdots,\ g_m(X) \ge 0 \,\}$. Здесь $X \subset \Re^m$, $\Re^m$ – m-мерное арифметическое пространство, $g_1(X)$, $\cdots$, $g_m(X)$ – ограничивающие функции. Задача многокритериальной оптимизации записывается в виде

$$\max_{X \in D_X} \Phi(X) = \Phi(X^*). \tag{1.4}$$

Не формально, множество Парето можно определить как множество, в котором значение любого из частных критериев оптимальности можно улучшить (увеличить) только за счет ухудшения (уменьшения) хотя бы одного из остальных критериев. Т.е. любое из решений, принадлежащих множеству Парето, не может быть улучшено одновременно по всем частным критериям оптимальности.

Приведем формальное определение множества Парето. Векторный критерий оптимальности $\Phi(X)$ выполняет отображение множества D_X в некоторое множество D_Φ пространства критериев, которое называется множеством достижимости. Введем на множестве D_Φ отношение предпочтения. Будем говорить, что вектор $\Phi^1 \in D_\Phi$ предпочтительнее вектора $\Phi^2 \in D_\Phi$ или вектор Φ^1 доминирует вектор Φ^2, и писать $\Phi^1 \succ \Phi^2$, если среди равенств и неравенств $\phi_k(X^1) \geq \phi_k(X^2)$, $k \in [1, m]$ имеется хотя бы одно строгое неравенство. Выделим из множества D_Φ подмножество точек D_Φ^* (фронт Парето), для которых нет более предпочтительных точек. Множество $D_X^* \in D_X$, соответствующее множеству D_Φ^*, называется множеством Парето. Таким образом, если $X \in D_X^*$, то $\Phi(X) \in D_\Phi^*$.

В рамках вышеизложенной методики сформулируем требования к оптической и радиочастотной частям гибридного беспроводного канала передачи данных, а так же постановку задачи по многомерной оптимизации его параметров.

1.5. Исследование влияния шумов и помех на выбор оптимальных параметров протокола передачи информации

С целью обоснования технических требований к оптической части оборудования беспроводного канала передачи данных необходимо формализовать связь между исходными данными на АОЛС и параметрами качества функционирования последней.

Приведем одну из возможных методик инженерного расчета АОЛС для систем передачи информации по атмосферному каналу.

Электромагнитные волны оптического диапазона при распространении в атмосфере испытывает воздействия со стороны последней, наиболее значимые из которых перечислены ниже.

1. Релеевское рассеяние оптического сигнала в атмосфере: энергетические потери оптического сигнала из-за аэрозольного и молекулярного (релеевского) рассеяния являются одним из главных факторов, определяющих искажение сигнала. Из теории

молекулярного (релеевского) рассеяния света следует следующее выражение для коэффициента рассеяния в газах $\sigma_{Релея}$:

$$\sigma_{Релея} = \frac{8\pi^3\left(n^2-1\right)}{3N\lambda^4} \cdot \frac{6+3\delta}{6-7\delta}, \tag{1.5}$$

где N – число молекул в единице объема; n – показатель преломления среды; λ – длина волны излучения; δ – фактор деполяризации рассеянного излучения, равный 0.035.

Энергетические потери оптических сигналов, обусловленные молекулярным рассеянием, могут быть определены с большой точностью, если известно распределение плотности по высоте. Обычно принято считать, что до высот 30 км. достаточно хорошо выполняется условие стандартной модели атмосферы, поэтому проблема количественной оценки указанных потерь считается решенной. На больших высотах плотность атмосферы может существенно изменяться в зависимости от места и времени, соответственно будут изменяться и коэффициенты молекулярного рассеяния. Однако при любом изменении мы всегда можем быть уверенными в том, что энергетическими потерями за счет релеевского рассеяния в инфракрасной области можно пренебречь.

2. Аэрозольное ослабление. Наиболее часто встречающиеся в атмосфере аэрозоли представляют собой капли воды в жидком и твердом состояниях, объединяемые общим понятием – гидрометеоры (дождь, туман, снег и т.д.).

Ослабление энергии волны видимого и инфракрасного диапазонов объясняется тем, что волна наводит в каплях токи смещения. Кроме того, токи смещения являются источниками вторичного и рассеянного излучения, что также создает эффект ослабления в направлении распространения волны, причем в видимом диапазоне основные потери энергии создаются за счет явления рассеяния.

Аэрозоли – это нормальная составляющая атмосферы; у поверхности Земли ее содержание меняется от нескольких мкг/м в очень чистом воздухе, до величины более 100 мкг/м в загрязненной атмосфере. К аэрозолям в атмосфере относятся переносимые ветром частицы пыли и морской соли, продукты сгорания (сажа, пепел), конденсированные органические остатки и вещества, образующиеся в результате химических реакций в атмосфере, включая такие соединения, как сульфаты, нитраты, H_2S, NH_3 и т.п. Макрочастицы, в своем большинстве, удаляются из атмосферы гравитацией, конденсации на частицах с последующим выпадением с дождем, а также за счет захвата выпадающими осадками.

Коэффициенты аэрозольного рассеяния очень сильно зависят от размеров, химического состава и концентрации частиц аэрозоля, которые подвержены большой изменчивости во времени и пространстве.

Несмотря на то, что размеры, концентрация, химический состав частиц атмосферных аэрозолей меняются в весьма широких пределах, можно выделить некоторые характерные типы аэрозолей (облака, туманы, дымки, осадки, пыль). С достаточной для инженерных расчетов точностью можно сказать, что концентрация аэрозоля с ростом высоты до 10 км уменьшается.

3. Влияние молекулярного поглощения. Атмосфера состоит главным образом из азота, кислорода и аргона, процентное содержание которых приведено в широком круге литературы.

Уменьшение давление с высотой достаточно хорошо описывается экспоненциальным законом. Концентрация водяного пара чрезвычайно изменчива во времени и пространстве. Однако, с увеличением высоты (по крайней мере до 10 км) она убывает.

В первом приближении энергию изолированной молекулы E можно представить в виде:

$$E = E_p + E_e + E_k + E_\upsilon, \tag{1.6}$$

где E_p – энергия поступательного движения, которая зависит от скорости движения и может принимать любые значения; E_e – энергия электронов; E_k, E_υ – колебательная и вращательная энергии.

Значения энергии электронов E_e, E_k и E_υ могут принимать только дискретные значения. Их изменение может происходить только скачком, сопровождающимся или поглощением или излучением кванта света определенной частоты.

Формула (6) справедлива только для случая, когда можно пренебречь взаимодействием различных видов движения молекулы. В общем случае, энергия молекулы записывается:

$$E = E_p + E_e + E_k + E_\upsilon + E_{ek} + E_{e\upsilon} + E_{k\upsilon}, \tag{1.7}$$

где последние три члена обязаны учету взаимодействия различных видов движения молекулы.

Величины электронной, колебательной и вращательной энергии молекулы имеют разные порядки. Так, энергия электронных переходов имеет порядок нескольких электрон-вольт, колебательная энергия измеряется десятыми и сотыми долями электрон вольт и вращательная энергия – тысячными и десятитысячными долями электрон-вольт.

Соответственно величине энергии электронов спектры молекул занимают ультрафиолетовую и видимую часть спектра, колебательные – близкую инфракрасную, вращательные – далекую инфракрасную и микроволновую.

Электронно-колебательно-вращательный спектр представляет собой набор полос. Каждой совокупности переходов молекулы между двумя электронными состояниями соответствует электронная полоса, состоящая из набора колебательно-вращательных полос. Каждая полоса имеет конечную ширину, контур спектральных линий определяется действием трех эффектов: радиационным затуханием; эффектом Доплера; эффектами столкновения молекул.

Кратко опишем спектр основных поглощающих газов.

Водяной пар. Анализ колебательно-вращательного спектра водяного пара показывает, что наиболее интенсивная и широкая полоса поглощения молекулы находится в диапазоне от 5.5 мкм до 7.5 мкм. Следующая сильная полоса поглощения от 2.6 до 3.3 мкм. В этих полосах полностью поглощается солнечное излучение в вертикальном столбе атмосферы. Другие колебательно-вращательные полосы поглощения с центрами около длин волн: 1.87; 1.38; 1.1; 0.94; 0.81; 0.72 мкм. Несколько слабых полос имеется в видимой области спектра.

Тонкая структура колебательно-вращательного спектра водяного пара чрезвычайно сложна и запутана. Каждая из этих полос состоит из сотен и даже тысяч отдельных линий, идентификация которых представляет собой весьма сложную задачу.

Углекислый газ. Одна из основных колебательно-вращательных полос с центром около длины волны 15 мкм вместе с 14 полосами верхних состояний занимает довольно широкий интервал спектра, примерно от 12 до 20 мкм. В районе центральной части этой полосы (13.5-16.5 мкм) вертикальный столб атмосферы полностью поглощает солнечное излучение. Вся эта совокупность полос часто в литературе называется полосой 15 мкм. Еще одна основная колебательно-вращательная полоса с центром в 4.3 мкм шириной от 4.2 до 4.4 мкм имеет такую высокую интенсивность, что полностью поглощает в этом диапазоне солнечное излучение уже на высоте 20 км.

Кроме основных полос, есть еще ряд небольших полос поглощения с центрами в: 10.4; 9.4; 5.2; 4.8; 2.7; 2.0; 1.6; 1.4 мкм и ряд слабых полос в районе от 1.24 мкм до 0.78 мкм.

Озон. Молекулы озона имеют полосы поглощения с центрами: 9.1; 9.6; 14.1 мкм. Обертоны и составные частоты колебаний молекулы озона создают колебательно-вращательные полосы этой молекулы в районах: 2.7; 3.27; 3.59; 4.75; 5.75 мкм, из которых наиболее интенсивной является полоса 4.75 мкм. Поглощение полосы в 9.6 мкм находится в центре длинноволнового «окна» прозрачности атмосферы 8–13 мкм. Ее центральная часть

шириной около 1.0 мкм в вертикальном столбе атмосферы поглощает примерно половину солнечного излучения.

Кислород. В ближней инфракрасной области молекула O_2^{16}. Имеет заметные полосы, центры которых располагаются около длин волн 1.2683 мкм и 1.0674 мкм. Молекула изотонической модификации кислорода $O^{16}O^{18}$ имеет полосы, лежащие в красной области в районах около длин волн: 0.7620 мкм, 0.6901 и 0.6317 мкм.

Закись азота. Молекула N_2O имеет много полос обертонов, составных частот и верхних состояний. Большинство их этих полос очень слабы. В солнечном спектре проявляются следующие полосы: 2.11; 2.16; 2.27; 2.28; 2.87; 2.97; 3.57; 3.88; 3.90; 4.06; 4.50; 4.52; 7.78; 9.56; 17.0 мкм.

Метан. Молекула CH_4 имеет следующие полосы поглощения с центрами: 1.67; 1.71; 1.73; 2.20; 2.32; 2.37; 2.43; 3.31; 3.55; 3.85; 7.66 мкм.

Окись углерода. Основная колебательно-вращательная полоса молекулы CO находится около 4.67 мкм.

Учет всех линий поглощения молекул в атмосфере весьма сложная задача. Учесть молекулярное поглощение можно двумя путями: составить физическую модель атмосферы и снять экспериментальные данные и экстраполировать их.

При расчете оптических атмосферных линий связи выбирается так называемое «окно» прозрачности атмосферы, в котором будет работать оптико-электронный прибор. В случае использования в качестве передающих элементов лазеров, необходимо с большой точностью знать спектр излучения лазера, спектр поглощения атмосферы на выбранном участке и закон изменения спектра излучения лазера от воздействия внешних возмущений (изменение давления, нагрев рабочего тела).

4. Влияние турбулентности. Световая волна, распространяющаяся в земной атмосфере, кроме энергетических потерь, испытывает флуктуации амплитуды и фазы, обязанные своим происхождением случайному пространственно-временному распределению показателя преломления воздуха. Последнее обусловлено турбулентными движениями в атмосфере, влекущими за собой случайное изменение температуры и связанного с ней показателя преломления.

Принципиальный физический результат теории распространения волн в турбулентной атмосфере состоит в том, что энергетические потери проходящего излучения оказываются незначительными по сравнению с потерями из-за молекулярного рассеяния, в то время как параметры оптической волны испытывают существенные случайные флуктуации.

Флуктуации амплитуды и фазы волны в оптическом пучке приводят к появлению помех, связанных с изменением структуры оптических пучков: расширению оптического пучка, флуктуациям направления его распространения и расщеплению оптического пучка.

Расширение пучка турбулентной атмосферой делает невозможной фокусировку оптического излучения на больших расстояниях. По мере увеличения диаметра источника дифракционное пятно в фокусе уменьшается в турбулентной атмосфере не в соответствии с известным в оптике однородных сред формулами, а до некоторого конечного размера, которое называют размером насыщения.

Флуктуации направления оптического пучка проявляются в смещении «центра тяжести» пучка относительно точки наблюдения. Различий в горизонтальной и вертикальной плоскостях не обнаружено. При проведении экспериментов максимальное отклонение луча лазера составило 1 мрад.

Расщепление оптического пучка на небольших расстояниях проявляется в виде сложной структуры наблюдаемого пятна (например на экране). С увеличением расстояния глубина пространственной модуляции возрастает. На больших расстояниях (в области сильных флуктуаций) оптический пучок оказывается расщепленным на тонкие нити, имеющие в сечении вид круглых и серповидных пятен. Форма пятен меняется от серповидной и круглой при боковом ветре до ячеистой при продольном.

Рассеяние оптических волн на случайных неоднородностях показателя преломления воздуха приводит к значительным по мощности флуктуациям интенсивности распространяющегося в атмосфере оптического излучения. Экспериментальное измерение флуктуации интенсивности оптического сигнала показало, что спектр флуктуации находиться в диапазоне от 0 до 5000 Гц, увеличение диаметра приемника приводит к уменьшению высокочастотной составляющей. Уменьшение происходит за счет усреднения большего количества принятого излучения. При диаметре приемника 100 мм, основной спектр флуктуации лежит от 0 до 2800 Гц.

5. Нелинейные эффекты распространения. При распространении в атмосфере оптического излучения гигантской мощности, возникает целая серия нелинейных эффектов. Рассмотрим некоторые, не требующие учета интерференционных явлений, многофотонные эффекты (многофотонная ионизация, диссоциация, приводящие к пробою слоя чистого воздуха), спектроскопический эффект насыщения, вызывающий частичное просветление поглощающего слоя газа, эффект самофокусировки луча, вызванный нелинейной зависимостью показателя преломления среды при ее облучении мощным потоком радиации, и эффект испарения частиц аэрозолей под действием импульсных и непрерывных источников излучения большой мощности.

Распространение мощного излучения ОКГ в среде может приводить к изменению величины показателя преломления в канале луча. Разница между значениями показателя преломления среды в канале луча и вне его может быть такой, при которой устраняется расходимость луча. Это явление получило название самофокусировки луча ОКГ.

Облучение частиц атмосферных аэрозолей мощным направленным излучением сопровождается рядом эффектов, приводящих к изменению условий распространения радиации в среде. Среди этих эффектов наибольший практический интерес представляет испарение частиц за счет поглощенной ими энергии поля. Изменение размеров частиц обуславливает соответствующее изменение объемных полидисперсных коэффициентов ослабления. Таким образом, прозрачность слоя рассеивающей среды становиться зависящей от интенсивности падающего излучения.

При воздействии на водный аэрозоль световых импульсов большой мощности и малой длительности частицы аэрозоля приобретают направленное движение, вызванное их неравномерным нагреванием. В результате такого направленного движения может происходить коагуляция частиц.

6. Фоновые помехи от посторонних источников в атмосфере. К фоновым помехам от посторонних источников в атмосфере будем относить те, которые не связаны с передачей оптического сигнала через атмосферу и существуют независимо от присутствия этого сигнала во внешнем (атмосферном) канале.

Рассмотрим общую характеристику фоновых помех различной природы. Среди естественных посторонних источников, взаимодействие оптического излучения которых с атмосферой приводит к появлению заметных фоновых помех, Солнце является наиболее мощным.

Не только прямое, прошедшее сквозь атмосферу, но и рассеянное и отраженное солнечное излучение во многих случаях является основным источником фоновых помех в атмосфере. Однако определяющим для уровня фонов при работе конкретных оптико-электронных систем является спектральный диапазон. Селективный спектральный состав приходящего излучения от источников (Солнце, Луна, молнии, метеоры и др.), требуют известной осторожности при оценке роли фоновых помех того или иного происхождения.

В инфракрасной области спектра становится заметный вклад энергии от теплового излучения атмосферы и земной поверхности. Соотношение вкладов теплового излучения и солнечного рассеянного или отраженного излучения в уровень фоновых помех в дневное время, зависит от многих факторов (от состояния атмосферы, условий наблюдения, положения солнца и др.). Тем не менее приближенно во всех случаях можно считать, что в области больше 4 мкм доминирует тепловое излучение атмосферы и земной

поверхности с максимумом в спектре излучения области около 10 мкм. В спектральной области меньше 3 мкм преобладает роль фоновых помех, обусловленных солнечным излучением с максимумом видимой области спектра. В интервале длин волн 3–4 мкм имеет место минимум уровня помех, обусловленных двумя составляющими излучению, одна из которых (солнечное излучение) убывает, а другая (тепловое излучение атмосферы и земной поверхности) возрастает с ростом длины волны. В литературе приведены данные по максимальной яркости фона для помех различной природы.

Кроме теплового равновесного излучения в атмосфере всегда присутствует неравновесное излучение, вызванное рядом физических и химических процессов, которое имеют место при взаимодействии оптической и жесткой солнечной радиации с атмосферой. Результатом этих процессов является слабая люминесценция атмосферы. Принято нетепловое оптическое излучение называть свечением атмосферы. Характерным для этого неравновесного излучения атмосферы является значительная спектральная селективность. В видимой области спектра свечение является линейчатым, в инфракрасной области эмиссионные линии имеют несколько большую спектральную ширину. При работе оптико-электронных систем в ночное время свечение атмосферы является существенной помехой.

На основе вышеизложенного для упрощения предварительных расчетов введем ряд допущений:

– релеевское рассеяние, нелинейные эффекты распространения и мультипликативные помехи рассеяния вперед пренебрежимо малы;

– затухание сигнала на наклонной трассе для высот до 10 км всегда меньше, чем на горизонтальной трассе той же протяженности на уровне моря;

– в выбранном окне прозрачности отсутствуют сильные полосы молекулярного поглощения.

Исходя из данных о молекулярном поглощении, можно выделить следующие «окна прозрачности» пригодные для передачи оптического сигнала: 400-1330 нм, исключая 1200 нм; 1520-1560 нм; 1590-2200 нм; 3000-3300 нм; 4100-4700 нм.

Опишем влияние погодных условий на оптический канал связи. Основным параметром, описывающим процесс взаимодействия оптического излучения с атмосферой, является метеорологическая дальность видимости (МДВ). Это расстояние, на котором свет с длиной волны 0,55 мкм ослабляется в 50 раз (на 17 дБ).

Погодные условия различаются как для различных географических районов, так и от года к году. Статистическим параметром погоды для конкретного географического места, определяющим надежность связи, является доля времени за год в течении которого МДВ меньше заданной величины. Обработка статистических данных метеорологических

наблюдений позволила установить эмпирическую зависимость этого параметра от расстояния:

$$P_{АОЛС}(L) = a_i \cdot L^{b_i}, \quad (1.8)$$

где $P_{АОЛС}(L)$ – вероятность наступления погодных условий, при которых МДВ меньше расстояния L (км); a_i и b_i – константы для конкретной географической точки. Соотношение справедливо для МДВ менее 17 км.

Фонового излучение на фотоприемнике (шум фотоприемника), состоит из трех составляющих: атмосферные оптические помехи; дробовые шумы; собственные шумы фотоэлемента и усилителя.

По свойствам и физической природе атмосферные оптические помехи можно разделить на две группы:

1. Постоянно присутствующие в атмосфере фоновые помехи, вызванные собственным излучением атмосферы и Земли или рассеянием оптического излучения от различных посторонних источников, в том числе Солнца, Луны, подстилающей поверхности и др. Помехи данной группы представляют собой в основном аддитивные помехи, которые суммируются с передаваемым сигналом и состоят из постоянной во времени (точнее медленно меняющейся, например, в течение суток) и случайной (быстро меняющейся) составляющих. Обе составляющие уменьшают динамический диапазон преемника и тем самым снижают эффективность всей системы передачи информации.

2. Помехи, за счет искажений оптического сигнала, вызванные взаимодействием сигнала с атмосферой. Помехи данной группы могут быть как аддитивные, так и мультипликативные атмосферные помехи, которые являются сомножителем в принимаемом сигнале. Этот вид помех снижает эффективность информационной системы, изменяя и величину и форму самого передаваемого сигнала. Причем увеличение мощности оптического сигнала не ведет к линейному росту отношение сигнал/шум. К мультипликативным помехам относится одно- и многократное рассеяние вперед оптического сигнала.

Дробовые шумы обусловлены изменением интенсивности из-за флуктуации количества принятых квантов оптического сигнала.

Собственные шумы фотоэлемента характеризуют шумовые свойства фотоэлемента и первого усилительного каскада входного усилителя. Собственные шумы зависят как от типа фотоэлемента, так и от его схемы включения, типа усилительного элемента входного усилителя и др.

Для расчета уровня оптических помех, примем, что для длин волн в диапазоне от 750 до 950 нм, фоновая помеха днем и ночью не более 10^{-2} и 10^{-6} Вт/см^2·ср·мкм соответственно. В данном случае основной шум будет вносится фоновым излучением, всеми остальными шумами можно пренебречь. Уровень оптических помех P_n:

$$P_n = 10^{-2} \cdot S_{ПРМ} \cdot \alpha \cdot \Delta\lambda, \tag{1.9}$$

где $S_{ПРМ}$ – площадь приемника (см^2); α – угол зрения приемника (ср); $\Delta\lambda$ – диапазон длин волн, принимаемый приемником (мкм).

Величина полного светового потока характеризует излучающий элемент, и ее нельзя увеличить никакими оптическими системами. Действие этих систем может лишь сводиться к перераспределению светового потока, например, большей концентрации его по некоторым направлениям.

Таким способом достигается увеличение силы света по данным направлениям при соответствующем уменьшении ее по другим направлениям. Таково, например, действие сигнальных аппаратов или прожекторов, позволяющих при помощи источников обладающих средней сферической силой света в несколько сто кандел, создавать на оси прожектора силу света в миллионы кандел.

Диаметр приемной антенны в данном случае меньше диаметра светового пятна создаваемого источником оптического сигнала. Для оценки потерь мощности можно использовать:

$$P_{LOST} = 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{\beta \cdot L}{D}\right), \tag{1.10}$$

где β – угол расходимости луча передатчика (рад); L – дистанция связи (м); D – диаметр приемного объектива (м).

Необходимо также в расчетах учитывать ослабление мощности самой оптической системой, которое зависит от её качества и сложности исполнения.

Сформулируем допустимые технические требования к оптической части оборудования беспроводного канала передачи данных (Таблица 1.4), приняв во внимание физические, экономические, физиологические и юридические ограничения, а так же показатели производительности, габариты, надежность и другие характеристики отечественных лазерных устройств.

Таблица 1.4. Требования к оптической части оборудования

№ п/п	***Наименование параметра***	***Допустимое значение***		
		мин.	***макс.***	***Типовое***

1.	*Длина волны излучения, нм*	***750***	***950***	***785***
2.	*Средняя выходная мощность, Дбм*	***0***	***+40***	***+39***
3.	*Угловой размер диаграммы направленности передатчика по уровню –3дБ, мрад*	***0.5***	***4***	***0.55***
4.	*Количество излучателей (лазеров)*	***1***	***7***	***3***
5.	*Чувствительность приемника (включая потери в оптике), Дбм*	***-40***	***-20***	***-30***
6.	*Количество приемных объективов*	***1***	***5***	***2***
7.	*Общая площадь приемного объектива, см^2*	***–***	***–***	***100***
8.	*Угол зрения приемника, мрад*	***0.5***	***4***	***2***

В процессе решения поставленной задачи по разработке широкополосных беспроводных телекоммуникационных средств нового поколения на основе комбинированных лазерных и радио- приемопередатчиков для построения телекоммуникационных сетей повышенной производительности и надежности необходимо оптимизировать параметры гибридной линии связи с учетом границ, указанных в таблице 4.

Требования к радиочастотной части оборудования

Приказом № 242-ст Федерального Агентства по Техническому Регулированию и Метрологии от 13 июля 2009 года утвержден ГОСТ-Р 53363-2009 «Цифровые радиорелейные линии. Показатели качества. Методы расчета». Дата введения документа: 01.01.2010 года. Стандарт разработан ООО «Научно-производственная компания «СвязьСервис» в партнерстве с СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. В документе изложена методика расчета цифровых радиорелейных линий (ЦРРЛ) от 4 до 40.5 ГГц.

На основе ГОСТ-Р 53363-2009 сформулируем допустимые технические требования к радиочастотной части оборудования беспроводного канала передачи данных (Таблица 1.5), приняв во внимание физические, экономические, физиологические и юридические ограничения, а так же показатели производительности, габариты, надежность и другие характеристики отечественного радиооборудования.

Таблица 1.5. Требования к радиочастотной части оборудования

№ п/п	Наименование параметра	Допустимое значение		
		мин.	макс.	Типовое
1	Скорость передачи данных Мбит/с	54	300	170
2	Ширина спектра сигнала по уровню 3dB	5	40	20
2	Выходная мощность, мВт	100	1000	600
4	Рабочие частоты, ГГц	4	11	6
5	Чувствительность приемника, dBm	-55	-100	-80

В процессе разработки широкополосных беспроводных телекоммуникационных средств нового поколения необходимо: оптимизировать параметры гибридной линии связи с учетом границ, указанных в таблице 5; сформулировать и исследовать различные критерии автоматического переключения режимов работы гибридной линии связи с целью выбора наилучшей системы управления переключением режимов работы гибридного беспроводного канала связи; оценить показатели качества.

1.6. Анализ динамики развития стандартов широкополосных беспроводных средств IEEE802.11, IEEE 802.16, CDMA-2000, UMTS (LTE), их сравнительный анализ.

Одним из перспективных направлений применения высокоскоростных и надежных гибридных каналов связи, на базе радио и лазерной технологий, является соединение базовых станций сотовой сети и мобильных сетей WiMAX. В связи с этим в настоящем разделе проводится сравнительный анализ характеристик сетей на базе технологий LTE (Long Term Evolution) и IEEE 802.16e, m с целью определения перспективности развития этих технологий.

Данное сравнение составлено по материалам WiMAX-форума, ведущих мировых фирм, а также результатов внедрения WiMAX-сетей и LTE в различных регионах мира и Российской Федерации.

Системы с технологией HSPA (3GPP релиз 6) коммерчески доступны с 2007 года. Технология предусматривает частотное дуплексирование (FDD) с шириной каждого дуплексного канала 5 МГц. В нисходящем канале используется модуляция QPSK либо 16-QAM, двойное пространственное разнесение на приеме (1×2 SIMO), пиковая скорость 14 Мбит/с. В восходящем канале модуляция BPSK либо QPSK, антенная конфигурация 1 x 2 SIMO, пиковая скорость 5,8 Мбит/с.

В то же время на рынке были системы WiMAX (релиз 1.0) с временным дуплексированием (TDD). При аналогичной ширине полосы 10 МГц они обеспечивали скорость в нисходящем канале в 2-3 раза более высокую, чем у HSPA (поскольку в WiMAX при TDD общая пропускная способность динамически распределяется между нисходящим и восходящим каналами, точное значение привести невозможно).

Следующим шагом в эволюции систем HSPA являются технологии HSPA+ (HSPA релиз 7 и отдельные поправки релиза 8). Системы HSPA+ стали доступны в конце 2008 года. В нисходящем канале их отличает модуляция 64-QAM с SIMO (1 × 2) или 16-QAM с MIMO (2 × 2). В восходящем канале добавлена модуляция 16-QAM и улучшены возможности для VoIP. Поправки в соответствии с релизом 8 (внедрение ожидается не

ранее 2009 года) позволяют использовать в нисходящем канале режим MIMO (2 × 2) с модуляцией 64-QAM, рассматривается возможность использования MIMO больших порядков в нисходящем канале и MIMO (2 × 2) – в восходящем канале.

Сравнивая мобильный WiMAX и HSPA+ (табл.6), можно сделать следующие выводы:

- Мобильный WiMAX (релиз 1.5) имеет сравнимые с HSPA+ (релиз 8) пиковые скорости в нисходящем канале при одинаковых модуляции, скорости кодирования и ширине канала. При этом у мобильного WiMAX в восходящем канале пиковая скорость выше в 2-3 раза.

- Системы HSPA+ ограничены шириной канала 2 × 5 МГц в традиционных спектральных условиях сетей 3G. Мобильный WiMAX поддерживает ширину канала до 20 МГц, как частотное, так и временное дуплексирование. Его частотные профили планируются в диапазонах 700, 1700, 2300, 2500, и 3500 МГц. Мобильный WiMAX обеспечивает «гладкую» IP-сеть (из конца в конец).

Следующим шагом в эволюции систем 3GPP, причем стратегическим шагом, являются системы Long Term Evolution (LTE). Их отличает технология OFDM A в нисходящем канале и SC-FDMA — в восходящем. Модуляция — до 64-QAM, ширина

Таблица 1.6. Сравнение систем HSPA (релизы 7 и 8) и WiMAX (релиз 1.5)

Параметры	HSPA			WiMAX	
Версия	Релиз 7		Релиз 8	Релиз 1.5	
Диапазон, ГГц	2,0			2,5	
Дуплексирование	FDD			FDD	TJ3J3
Ширина канала, МГц	2 x 5			2 x 5	10
Антенны ВС	1 x 2	2 x 2		2 x 2	
Антенны АС	1 x 2			1 x 2	
Модуляция и скорость кодирования					
В нисходящем канале	64-QAM, 5/6	16-QAM, 3/4	64-QAM, 5/6	64-QAM, 5/6	
В восходящем канале	16-QAM, 3/4			64-QAM, 5/6	
Пиковая скорость, Мбит/с					
В нисходящем канале	17,5	21	35	36	48
В восходящем канале	8,3	8,3	8,3	17	24

канала— до 20 МГц, дуплексирование TDD и FDD. Применены адаптивные антенные системы, гибкая сеть доступа. Сетевая архитектура — полностью IP-сеть. В системе LTE используются технологии и методы, уже применяемые в мобильном WiMAX, поэтому следует ожидать схожей эффективности систем LTE (Таблица 1.7 и Таблица 1.8).

Таблица 1.7. Сравнение параметров реальных систем LTE (по отчетам производителей) и мобильного WiMAX (релиз1.5) в одинаковых частотных условиях при FDD с полосами 2x20 МГц

Параметры	LTE			WiMAX Релиз 1.5
	Motorola	T-Mobile	Qualcomm	
Нисходящий канал				

Антенна ВС	2 x 2	4 x 4	2 x 4	4 x 2	2 x 2	4 x 4
Модуляция и скорость кодирования	64-QAM, 5/6		64-QAM, 5/6	64-QAM, нет данных	64-QAM, 5/6	
Скорость, Мбит/с	117	226	144	277	144,6	289
Восходящий канал	Нет данных					
Антенна АС			1 x 2	1 x 2	1 x 2	
Модуляция и скорость кодирования			64-QAM	16-QAM	64-QAM, 5/6	
Скорость, Мбит/с			50,4	75	69,1	

Следует отметить, что системы LTE — это революционное улучшение 3G. LTE представляет переход от систем CDMA к системам OFDMA, а также переход от системы с коммутацией каналов к IP-системе с коммутацией пакетов. Поэтому внедрение этой технологии на существующих сетях сотовой связи означает, как минимум, необходимость новых радиочастотных ресурсов для получения преимущества от широкого канала. Кроме того, для обеспечения обратной совместимости необходимы двухрежимные абонентские устройства. Поэтому плавный переход от систем 3G к LTE весьма проблематичен.

Дальнейшее развитие мобильного WiMAX будут описывать спецификации релиза 2.0. Он будет основан на стандарте IEEE 802.16m, который отражает требования IMT-

Таблица 1.8. Сравнение ключевых параметров LTE и WiMAX

Параметры	LTE	WiMAX Релиз 1.5
Дуплексирование	FDD и TDD	FDD и TDD
Частотный диапазон для анализа	2000 МГц	2500 МГц
Ширина канала	до 20 МГц	до 20 МГц
От базы	OFDMA	OFDMA
К базе	SC-FDMA	OFDMA
Спектральная эффективность, бит/Гц/с		
Нисходящий канал, MIMO (2 x 2)	1,57	1,59
Восходящий канал, SIMO (1 x 2)	0,64	0,99
Максимальная скорость мобильной станции, км/ч	350	120
Длительность кадра, мс	1	5
Антенные системы		
Нисходящий канал	2 x 2 , 2 x 4 , 4 x 2 , 4 x 4	2 x 2 , 2 x 4 , 4 x 2 , 4 x 4
Восходящий канал	1 x 2 , 1 x 4 , 2 x 2 , 2 x 4	1 x 2 , 1 x 4 , 2 x 2 , 2 x 4

Advanced. В соответствии с ними, по сравнению с параметрами WiMAX релиз 1.0 вдвое увеличатся спектральная эффективность в нисходящем (до 2,6 бит/с/Гц) и восходящем (1,3 бит/с/Гц) каналах (Рисунок 1.11.). Этот параметр возрастет вдвое и на границе соты базы — до 0,09 и 0,05 бит/с/Гц для нисходящего и восходящего каналов, соответственно.

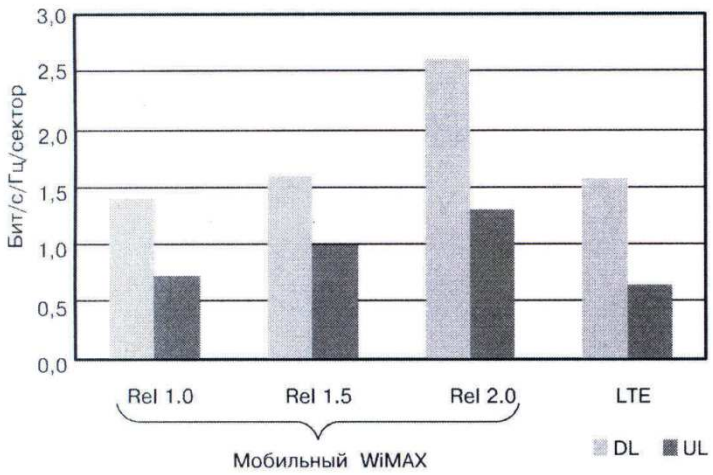

Рис.1.11. Сравнение средней спектральной эффективности

Станут возможными более 60 одновременных голосовых сессий на мегагерц для речевого кодека Л MR (12,2 кбит/с). Появится режим расширения каналов за счет интеграции отдельных частотных полос — как смежных, так и нет (всего до 100 МГц). Допустимая скорость перемещения мобильных терминалов возрастет до 500 км/ч. Сократится время установления соединения, общая задержка радиосети и время переключения при хендовере. При этом гарантируется полная обратная совместимость с системами WiMAX релиза 1.0 и 1.5. технологий WiMAX и LTE.

Отметим, что преимущество в спектральной эффективности означает выигрыш в стоимости развертывания сети (в том числе в удельной стоимости по отношению к пропускной способности сети). Кроме того, возрастает канальная емкость, что позволяет операторам вводить дополнительные сервисы.

Мобильный WiMAX представляет гладкую IP-сеть, сеть LTE более сложна (Рисунок 1.12). Если сеть WiMAX основывается полностью на IP-протоколах IETF, то сеть LTE более сложна, включает больше протоколов, в том числе — проприетарные протоколы 3G. Немаловажно, что интеллектуальная собственность в области технологий WiMAX, соответствующие патенты распределены среди многих компаний, создан открытый патентный альянс, что позволяет снижать цены абонентских устройств.

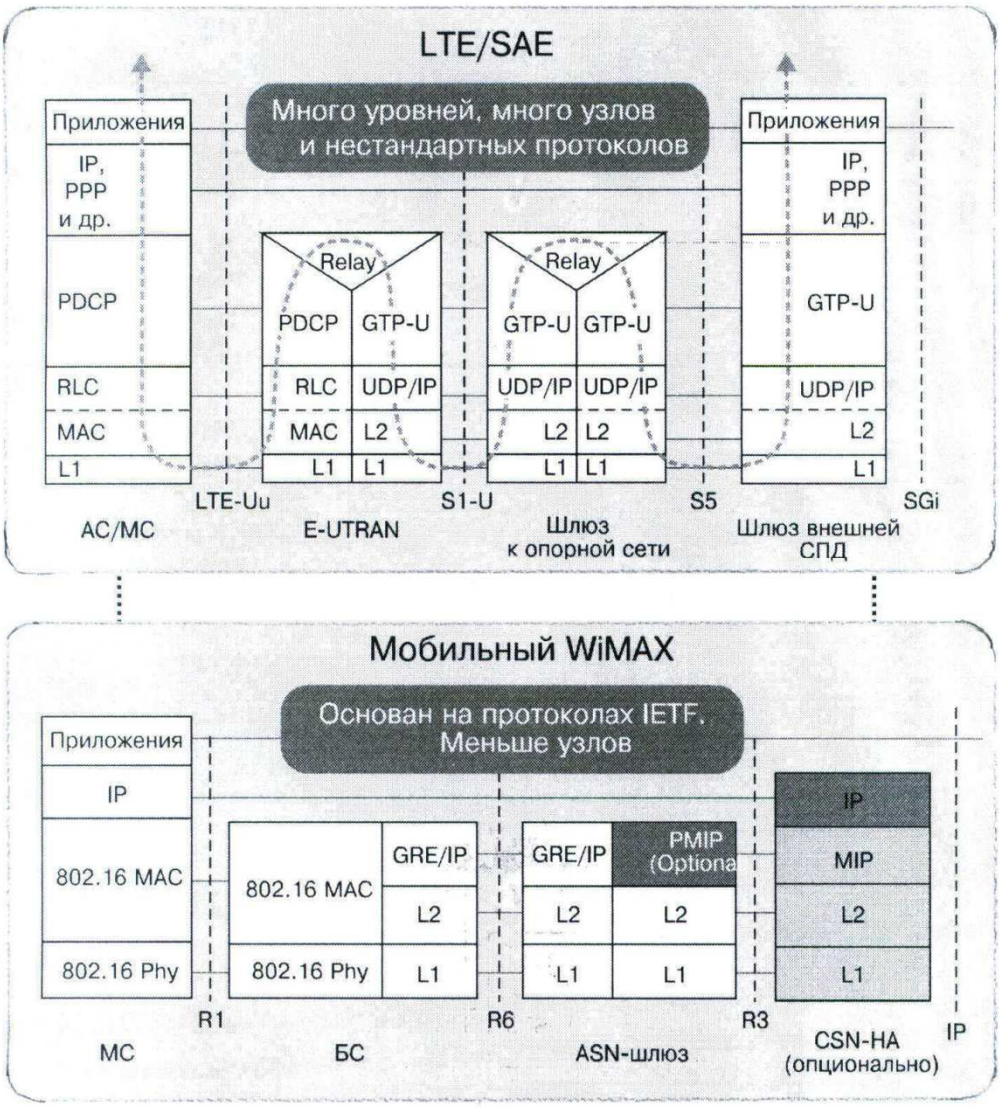

Рисунок 1.12. Сравнение системных архитектур WiMAX и LTE

Главное преимущество мобильного WiMAX — время выхода на рынок. К концу 2008 года только сертифицированных продуктов WiMAX было почти 100, к 2011 году их число возрастет на порядок. Ряд сетей мобильного WiMAX уже введены в коммерческую эксплуатацию. Сети же LTE только начали разворачивать с середины 2009 года. Учитывая, что объем инвестиций для апгрейда уже существующих 3С-сетей в сети LTE сравним с затратами на развертывание WiMAX-сетей, фактор времени становится решающим при выборе технологий 4G.

Следует отметить, что в LTE напрямую не реализована передача речи. Она возможна на основе платформы IMS. Однако порядка 40 компаний – и производители, и операторы – объединили усилия в рамках альянса VoLGA (Voice over LTE via Generic Access), цель которого – разработать алгоритмы передачи речи в полностью-IP сетях. К февралю 2011 года должны быть разработаны и алгоритмы, и устройства для прямой передачи речи в

сетях LTE. В конце 2011 года появится многомодовое абонентское оборудование, позволяющее передавать не только данные, но и речь. Не нужно будет создавать дополнительные надстройки в сетевой инфраструктуре, чтобы использовать SIP-протокол и IMS- подсистему.

Таким образом, можно в целом говорить, что с технической точки зрения и WiMAX, и LTE представляют собой примерно одинаковый класс систем. И весь вопрос — какая технология окажется коммерчески более успешной.

В настоящее время во всем мире идет активное разворачивание сетей LTE. В декабре 2009 года компания Telia Sonera запустила первую LTE-сеть в Осло, позднее – в Стокгольме. Сегодня эти сети развиваются и покрывают две страны - Швецию и Норвегию. В этом году будут строиться другие сети в Европе. В США в 2009 году в тестовом режиме запущена сеть Verizon Wireless в диапазоне 700 МГц. Сеть LTE развернута в Гонконге. На Всемирной выставке ЭКСПО-2010 в Шанхае работают две сети LTE компании China Mobile на оборудовании Huawei Technolkgies и Motorola. Сейчас идут тестовые испытания, в ближайшее время запланированы к строительству 59 сетей во всем мире. Развивается парк сетевого и абонентского оборудования, как минимум 10 производителей уже представили свои многомодовые абонентские устройства, поддерживающие как режим TDD, так и FDD в диапазонах 2,3 и 2,6 ГГц, а также 700 МГц.

Производители сделали выбор – формируется рынок LTE, имеющий очень большой потенциал. Ведь LTE, является продолжением 3G, а в мире порядка 600 млн. абонентов таких сетей. И все они – потенциальные клиенты LTE. Это – огромный рынок абонентских устройств и сетевой инфраструктуры. Недаром самые стойкие последователи WiMAX, например, компания Alvarion, объявили о планах поддержки LTE. Если даже Alvarion создает конкуренцию продуктов внутри одной компании - это означает, что WiMAX прошел свой пик привлекательности. Сейчас эта технология со слабо финансируемой базой медленно эволюционирует и уже не является инновационной. Значительно более высокие рыночные ожидания связаны с LTE, что и определяет поведение производителей и инвесторов.

Поскольку в России следует внедрять новейшие достижения, то основным направлением технической политики большинства компаний станет строительство сетей LTE – эта технология более инновационна, у нее больше возможностей и шире рыночный потенциал при примерно равных с WiMAX затратах на развертывание сетей.

Поэтому позиция и регулятора, и руководства ОАО «Связьинвест» склоняются в пользу внедрения в России более инновационной технологии LTE.

2. Разработка математических моделей для оценки характеристик производительности и надежности гибридного канала связи

2.1 Разработка математической модели гибридного канала с использованием методов теории стохастических систем и сетей для оценки характеристик производительности и надежности

2.1.1 Математическая модель гибридного беспроводного канала связи с резервным радиоканалом (холодный резерв радиоканалом IEEE 802.11n)

Модель гибридного канала представляет собой однолинейную систему массового обслуживания с двумя возможными скоростями обслуживания и ограниченным временем их использования.

Входящий поток заявок в систему — стационарный пуассоновский с параметром λ. Число мест для ожидания неограничено.

При использовании *k*-й скорости (*k*-го режима) время обслуживания заявки распределено экспоненциально с параметром μ_k, $k = 1,2$. При этом полагаем, что $\mu_1 > \mu_2$. Время использования *k*-й скорости ограничено и характеризуется абсолютно непрерывной случайной величиной ξ_k, имеющей плотность гиперэкспоненциального распределения второго порядка $F_k(t) = p_k \gamma_1^k e^{-\gamma_1^k t} + (1 - p_k)\gamma_2^k e^{-\gamma_2^k t}$, параметры которого определены с помощью подхода, описанного в разделе 2.4.

Если время первого режима завершается (ОАК становится недоступным), текущее обслуживание заявки (передача пакета) прерывается и система переходит на второй режим работы (использование радиоканала). Сразу после перехода на второй режим обслуживания пакетов не производится. Система должна выждать время Q_2, и если за это время второй режим работы не завершился ($\xi_2 > Q_2$), то по истечении времени Q_2 начинается обслуживание заявки (передача пакета) на второй скорости (по радиоканалу). При этом предполагаем, что заявка, обслуживание которой по оптическому каналу было прервано, обслуживается заново.

По истечении времени работы второго режима (когда ОАК канал вновь становится доступным) система, продолжая обслуживать заявки во втором режиме, наблюдает доступность оптического канала по времени. И если ОАК доступен в течение определенного времени, то по истечении этого времени система переходит на первый режим работы (оптический канал). При этом заявка, в ходе обслуживания которой произошла смена режима, обслуживается заново на новой скорости. Время, которое должен превысить период доступности ОАК, определяется всякий раз, когда ОАК становится доступным, из экспоненциального распределения с параметром Q_1.

В следующем разделе данная модель исследуется методом вложенных цепей Маркова с целью нахождения стационарных вероятностей состояний системы, которые далее будут вычислены с помощью матрично-аналитического подхода.

2.1.2 Вложенная цепь Маркова

Предположим, что система функционирует в стационарном режиме. Условия существования стационарного режима будут получены позже.

Предполагаем, что система может находиться в следующих четырех состояниях:

1 — работа в первом режиме (использование ОАК),

1' — переключение с первого режима на второй (с оптического на радиоканал),

2 — работа во втором режиме (использование радиоканала),

2' — переключение со второго на первый режим (с радиоканала на оптический).

Будем наблюдать поведение системы в моменты завершения обслуживания и моменты окончания и смены режимов работы. Обозначим через t_n — n-й такой момент, $n \le 1$. Под состоянием системы в момент t_n будем понимать вектор

$$X_n = (i_n, m_n, m'_n),$$

где i_n — число заявок в системе в момент времени $t_n + 0$, m_n — состояние обслуживающего прибора в момент $t_n - 0$, m'_n — состояние обслуживающего прибора в момент $t_n + 0$. Здесь мы полагаем, что состоянию (i, m, m) соответствует завершение обслуживания заявки, $m \in \{1, 2, 2'\}$.

Введем стационарные вероятности состояний системы:

$$\pi(i, m, m') = \lim_{n\to\infty} P\{i_n = i, m_n = m, m'_n = m'\},\ i \ge 0, m, m' \in \{1, 1', 2, 2'\}.$$

Пусть также

$$f_i^{(k)} = \int_0^\infty \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t} e^{-\mu_k t} \left(p_k e^{-\gamma_k^{(1)} t} + (1 - p_k) e^{-\gamma_k^{(2)} t} \right) \mu_k dt$$

— вероятность того, что за время обслуживания заявки в режиме k в систему поступят i заявок,

$$g_i^{(k)} = \int_0^\infty \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t} e^{-\mu_k t} \left(p_k \gamma_k^{(1)} e^{-\gamma_k^{(1)} t} + (1 - p_k) \gamma_k^{(2)} e^{-\gamma_k^{(2)} t} \right) dt$$

— вероятность того, что за время обслуживания заявки в режиме k время использования режима истекает (оптический канал становится недоступным, если использовался режим 1 (k=1), или доступным, если использовался режим 2 (k=2)) и за неполное время обслуживания в систему поступят i заявок,

$$h_i^{(1)} = \int_0^{Q_2} \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t} \left(p_2 \gamma_2^{(1)} e^{-\gamma_2^{(1)} t} + (1 - p_2) \gamma_2^{(2)} e^{-\gamma_2^{(2)} t} \right) dt$$

— вероятность того, что время переключения с первого режима на второй меньше, чем Q_2, и за время переключения в систему поступят i заявок,

$$h_i^{(2)} = \frac{(\lambda Q_2)^i}{i!} e^{-\lambda Q_2} \left(p_2 e^{-\gamma_2^{(1)} Q_2} + (1 - p_2) e^{-\gamma_2^{(2)} Q_2} \right)$$

— вероятность того, что время переключения с первого режима на второй больше, чем Q_2, и за время переключения в систему поступят i заявок,

$$r_i = \int_0^\infty \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t} e^{-Q_1 t} \mu_2 e^{-\mu_2 t} dt$$

— вероятность того, что за время обслуживания заявки при переключении со второго режима на первый в систему поступят i заявок,

$$m_i = \int_0^\infty \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t} e^{-Q_1 t} Q_1 e^{-\mu_2 t} dt$$

— вероятность того, что за время обслуживания заявки при переключении со второго режима на первый это переключение завершается и за неполное время обслуживания в систему поступят i заявок.

Эти вероятности (кроме $h_i^{(2)}$, которые заданы явно) могут быть вычислены следующим образом:

$$f_i^{(k)} = p_k \frac{\mu_k \lambda^i}{(\gamma_k^{(1)} + \mu_k + \lambda)^{i+1}} + (1 - p_k) \frac{\mu_k \lambda^i}{(\gamma_k^{(2)} + \mu_k + \lambda)^{i+1}}, \ k = 1,2,$$

$$g_i^{(k)} = p_k \frac{\gamma_k^{(1)} \lambda^i}{(\gamma_k^{(1)} + \mu_k + \lambda)^{i+1}} + (1 - p_k) \frac{\gamma_k^{(2)} \lambda^i}{(\gamma_k^{(2)} + \mu_k + \lambda)^{i+1}}, \ k = 1,2,$$

$$h_i^{(1)} = \frac{\gamma_2^{(1)} \lambda^i p_2}{\gamma_2^{(1)} + \lambda} \left[\frac{1}{(\gamma_2^{(1)} + \lambda)^i} - e^{-(\gamma_2^{(1)} + \lambda) Q_2} \sum_{m=0}^{i} \frac{Q_2^m}{m! (\gamma_2^{(1)} + \lambda)^{i-m}} \right] +$$

$$+ \frac{\gamma_2^{(1)} \lambda^i p_2}{\gamma_2^{(1)} + \lambda} \left[\frac{1}{(\gamma_2^{(1)} + \lambda)^i} - e^{-(\gamma_2^{(1)} + \lambda) Q_2} \sum_{m=0}^{i} \frac{Q_2^m}{m! (\gamma_2^{(1)} + \lambda)^{i-m}} \right],$$

$$r_i = \frac{\mu_2 \lambda^i}{(Q_1 + \mu_2 + \lambda)^{i+1}},$$

$$m_i = \frac{Q_1 \lambda^i}{(Q_1 + \mu_2 + \lambda)^{i+1}}, \quad i \geq 0.$$

Заметим, что за время переключения со второго режима на первый в систему как поступают заявки, так и уходят из нее. Поэтому для удобства будем полагать, что в каждый момент завершения такого переключения с вероятностью

$$\alpha = p_1 \frac{\gamma_1^{(1)}}{\gamma_1^{(1)} + Q_1} + (1 - p_1) \frac{\gamma_1^{(2)}}{\gamma_1^{(2)} + Q_1}$$

система начинает использовать первый режим работы, а с дополнительной вероятностью $1-\alpha$ — остается работать во втором режиме. Уточним, что величина α есть вероятность того, что начавшееся время первого режима больше, чем время переключения, и таким образом, с этой вероятностью система может переключиться на первый режим работы.

Далее, используя введенные выше вспомогательные вероятности, составим уравнения равновесия для стационарных вероятностей $\pi(i,m,m')$ состояний системы

$$\pi(i,1,1)=\sum_{k=1}^{i+1}(\pi(k,1,1)+\pi(k,2',1)+\pi(k,1',1))\,f_{i-k+1}^{(1)}+ \\ +(\pi(0,1,1)+\pi(0,2',1)+\pi(0,1',1))s_1 f_i^{(1)}, \tag{2.1}$$

$$\pi(i,1,1')=\sum_{k=1}^{i}(\pi(k,1,1)+\pi(k,2',1)+\pi(k,1',1))\,g_{i-k}^{(1)}+ \\ +(\pi(0,1,1)+\pi(0,2',1)+\pi(0,1',1))v_i^{(1)}, \tag{2.2}$$

$$\pi(i,1,r)=\sum_{k=0}^{i}\pi(k,1,1')h_{i-k}^{(r)},\ r=1,2, \tag{2.3}$$

$$\pi(i,2,2)=\sum_{k=1}^{i+1}(\pi(k,2,2)+\pi(k,2',2)+\pi(k,1',2))\,f_{i-k+1}^{(2)}+ \\ +(\pi(0,2,2)+\pi(0,2',2)+\pi(0,1',2))s_2 f_i^{(2)}, \tag{2.4}$$

$$\pi(i,2,2')=\sum_{k=1}^{i}(\pi(k,2,2)+\pi(k,2',2)+\pi(k,1',2))\,g_{i-k}^{(2)}+ \\ +(\pi(0,2,2)+\pi(0,2',2)+\pi(0,1',2))v_i^{(2)}, \tag{2.5}$$

$$\pi(i,2',2')=\sum_{k=1}^{i+1}(\pi(k,2',2')+\pi(k,2,2'))\,r_{i-k+1}+ \\ +(\pi(0,2',2')+\pi(0,2,2'))\frac{\lambda}{\lambda+Q_1}r_i, \tag{2.6}$$

$$\pi(i,2',1)=\sum_{k=1}^{i}(\pi(k,2',2')+\pi(k,2,2'))m_{i-k}\alpha+ \\ +(\pi(0,2',2')+\pi(0,2,2'))\left(\frac{\lambda\alpha}{\lambda+Q_1}m_{i-1}+\frac{Q_1\alpha}{\lambda+Q_1}I_{\{i=0\}}\right), \tag{2.7}$$

$$\pi(i,2',2)=\sum_{k=1}^{i}(\pi(k,2',2')+\pi(k,2,2'))m_{i-k}(1-\alpha)+ \\ +(\pi(0,2',2')+\pi(0,2,2'))\left(\frac{\lambda(1-\alpha)}{\lambda+Q_1}m_{i-1}+\frac{Q_1(1-\alpha)}{\lambda+Q_1}I_{\{i=0\}}\right), \tag{2.8}$$

где $I_{\{A\}}$ - функция-индикатор события *A*,

$$s_m = p_m \frac{\lambda}{\lambda + \gamma_m^{(1)}} + (1 - p_m)\frac{\lambda}{\lambda + \gamma_m^{(2)}}, \quad m = 1,2,$$

$$v_i^{(m)} = s_m g_{i-1}^{(m)} I_{\{i>0\}} + (1 - s_m) I_{\{i=0\}}, \quad i \ge 0.$$

Заметим, что из системы (2.1)-(2.8) можно непосредственно исключить равенства (2.3), таким образом, получим

$$\pi(i,1,1) = \sum_{k=1}^{i+1}(\pi(k,1,1) + \pi(k,2',1)) f_{i-k+1}^{(1)} + \sum_{k=1}^{i+1}\pi(k,1,1') \bar{f}_{i-k+1}^{(1)} + \\ + (\pi(0,1,1) + \pi(0,2',1)) s_1 f_i^{(1)} + \pi(0,1,1')\left((s_1 f_i^{(1)} - f_{i+1}^{(1)}) h_0^{(1)} + \bar{f}_{i+1}^{(1)}\right), \tag{2.9}$$

$$\pi(i,1,1') = \sum_{k=1}^{i}(\pi(k,1,1) + \pi(k,2',1)) g_{i-k}^{(1)} + \sum_{k=1}^{i}\pi(k,1,1') \bar{g}_{i-k}^{(1)} + \\ + (\pi(0,1,1) + \pi(0,2',1)) v_i^{(1)} + \pi(0,1,1')\left((v_i^{(1)} - g_i^{(1)}) h_0^{(1)} + \bar{g}_i^{(1)}\right), \tag{2.10}$$

$$\pi(i,2,2) = \sum_{k=1}^{i+1}(\pi(k,2,2) + \pi(k,2',2)) f_{i-k+1}^{(2)} + \sum_{k=1}^{i+1}\pi(k,1,1') \bar{f}_{i-k+1}^{(2)} + \\ + (\pi(0,2,2) + \pi(0,2',2)) s_2 f_i^{(2)} + \pi(0,1,1')\left((s_2 f_i^{(2)} - f_{i+1}^{(2)}) h_0^{(2)} + \bar{f}_{i+1}^{(2)}\right), \tag{2.11}$$

$$\pi(i,2,1') = \sum_{k=1}^{i}(\pi(k,2,2) + \pi(k,2',2)) g_{i-k}^{(2)} + \sum_{k=1}^{i}\pi(k,1,1') \bar{g}_{i-k}^{(2)} + \\ + (\pi(0,2,2) + \pi(0,2',2)) v_i^{(2)} + \pi(0,1,1')\left((v_i^{(2)} - g_i^{(2)}) h_0^{(2)} + \bar{g}_i^{(2)}\right), \tag{2.12}$$

$$\pi(i,2',2') = \sum_{k=1}^{i+1}(\pi(k,2',2') + \pi(k,2,2')) r_{i-k+1} + \\ + (\pi(0,2',2') + \pi(0,2,2')) \frac{\lambda}{\lambda + Q_1} r_i, \tag{2.13}$$

$$\pi(i,2',1) = \sum_{k=1}^{i}(\pi(k,2',2') + \pi(k,2,2')) m_{i-k}\alpha + \\ + (\pi(0,2',2') + \pi(0,2,2'))\left(\frac{\lambda\alpha}{\lambda + Q_1} m_{i-1} + \frac{Q_1\alpha}{\lambda + Q_1} I_{\{i=0\}}\right), \tag{2.14}$$

$$\pi(i,2',2) = \sum_{k=1}^{i}(\pi(k,2',2') + \pi(k,2,2')) m_{i-k}(1-\alpha) + \\ + (\pi(0,2',2') + \pi(0,2,2'))\left(\frac{\lambda(1-\alpha)}{\lambda + Q_1} m_{i-1} + \frac{Q_1(1-\alpha)}{\lambda + Q_1} I_{\{i=0\}}\right), \tag{2.15}$$

где

$$\bar{f}_i^{(m)} = \sum_{k=0}^{i} h_k^{(m)} f_{i-k}^{(m)}, \quad \bar{g}_i^{(m)} = \sum_{k=0}^{i} h_k^{(m)} g_{i-k}^{(m)}, \quad i \ge 0, m = 1,2.$$

2.1.3 Матрично-аналитический метод вычисления стационарных вероятностей

Для вычисления стационарных вероятностей $\pi(i,m,m')$, $i \ge 0$, $m, m' \in \{1,1',2,2'\}$ (за исключением $\pi(i,1',r)$, которые могут быть вычислены по

формулам (2.3) применим матрично-аналитический подход, который основан на идее сенсорных цепей Маркова (см., например, [34, 35]). Близкие алгоритмы изложены в работах [36-39].

Введем в рассмотрение векторы стационарных вероятностей

$$\overline{\pi}_i = (\pi(i,1,1), \pi(i,1,1'), \pi(i,2,2), \pi(i,2,2'), \pi(i,2',2'), \pi(i,2',1), \pi(i,2',2)).$$

Тогда систему уравнений (2.9)-(2.15) можно переписать в векторно-матричной форме

$$\overline{\pi}_i = \sum_{k=0}^{i+1} \overline{\pi}_k P_{k,i}, \ i \ge 0,$$

где матрицы $P_{i,l}$, $i \ge 0, l \ge \min\{ i-1, 0\}$, имеют вид

$$P_{0,l} = \begin{bmatrix} A_l & O_{3\times 3} \\ O_{2\times 4} & B_l \\ C_l & O_{2\times 3} \end{bmatrix},$$

$P_{i,l} = Y_{l-i+1}$ для $l \ge i-1$, где

$$Y_l = \begin{bmatrix} f_l^{(1)} & g_{l-1}^{(1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \bar{f}_l^{(1)} & \bar{g}_{l-1}^{(1)} & \bar{f}_l^{(2)} & \bar{g}_{l-1}^{(2)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f_l^{(2)} & g_{l-1}^{(2)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_l & \alpha m_{l-1} & (1-\alpha)m_{l-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_l & \alpha m_{l-1} & (1-\alpha)m_{l-1} \\ f_l^{(1)} & g_{l-1}^{(1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f_l^{(2)} & g_{l-1}^{(2)} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \ l \ge 0, \tag{2.16}$$

$$A_l = \begin{bmatrix} s_1 f_l^{(1)} & v_l^{(1)} & 0 & 0 \\ y_l^{(1)} & \bar{g}_l^{(1)} + h_0^{(1)}(v_l^{(1)} - g_l^{(1)}) & y_l^{(2)} & \bar{g}_l^{(2)} + h_0^{(2)}(v_l^{(2)} - g_l^{(2)}) \\ 0 & 0 & s_2 f_l^{(2)} & v_l^{(2)} \end{bmatrix},$$

$$B_l = \begin{bmatrix} \dfrac{\lambda}{\lambda+Q_1} r_l & \dfrac{\lambda\alpha}{\lambda+Q_1} m_{l-1} + \dfrac{Q_1\alpha}{\lambda+Q_1} I_{\{l=0\}} & \dfrac{\lambda(1-\alpha)}{\lambda+Q_1} m_{l-1} + \dfrac{Q_1(1-\alpha)}{\lambda+Q_1} I_{\{l=0\}} \\ \dfrac{\lambda}{\lambda+Q_1} r_l & \dfrac{\lambda\alpha}{\lambda+Q_1} m_{l-1} + \dfrac{Q_1\alpha}{\lambda+Q_1} I_{\{l=0\}} & \dfrac{\lambda(1-\alpha)}{\lambda+Q_1} m_{l-1} + \dfrac{Q_1(1-\alpha)}{\lambda+Q_1} I_{\{l=0\}} \end{bmatrix},$$

$$C_l = \begin{bmatrix} s_1 f_l^{(1)} & v_l^{(1)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_2 f_l^{(2)} & v_l^{(2)} \end{bmatrix}, \ l \ge 0,$$

$$y_i^{(m)} = (s_m f_i^{(m)} - f_{i+1}^{(m)}) h_0^{(m)} + \bar{f}_{i+1}^{(m)}, \ m = 1,2, \ i \ge 0.$$

В (2.16) полагаем, что $g_{-1}^{(1)} = g_{-1}^{(2)} = \bar{g}_{-1}^{(1)} = \bar{g}_{-1}^{(2)} = m_{-1} = 0.$

Отметим, что известные алгоритмы, основанные на идее сенсорных цепей Маркова, предполагают, что счетная компонента цепи Маркова, описывающей поведение системы (в нашем случае компонента i_n цепи X_n, $n \geq 1$), совершает переход не более, чем на единицу влево, за один шаг.

Пусть $G^{(k)}$ есть матрица вероятностей переходов конечных компонент цепи Маркова X_n, $n \geq 1$ за время, в течение которого значение счетной компоненты уменьшится с k+1 до k, $k \geq 0$. Матрицы $G^{(k)}$, $k \geq 0$, удовлетворяют соотношениям

$$G^{(k)} = P_{k+1,k} + \sum_{i=k+1}^{\infty} P_{k+1,i} G^{(i-1)} G^{(i-2)} \ldots G^{(k)}, \; k \geq 0. \tag{2.17}$$

В силу того, что матрицы $P_{i,l}$ зависят лишь от разницы *l-i*, то матрицы $G^{(k)}$ в (2.17) не зависят от *k* (будем полагать, что все $G^{(k)} = G$) и определяются как решение матричного уравнения

$$G^{(k)} = \sum_{l=i-1}^{\infty} P_{i,l} G^{l-i+1}. \tag{2.18}$$

Уравнение (2.18) решается итерационно, например, с помощью итерационной схемы

$$G_0 = I, \quad G_n = \left(I - \sum_{l=i}^{\infty} P_{i,l} G_{n-1}^{l-i} \right)^{-1} P_{i,i-1}, \; n \geq 1, \tag{2.19}$$

а матрица *G* определяется как $G = \lim_{n \to \infty} G_n$..

Далее, следуя рассуждениям, приведенным в [34, 35], получаем, что векторы стационарных вероятностей $\overline{\pi}_i$, $i \geq 0$, вычисляются следующим образом:

$$\overline{\pi}_k = \overline{\pi}_0 \Phi_k, \; k \geq 1, \tag{2.20}$$

где $\Phi_0 = I$,

$$\Phi_k = \sum_{i=0}^{k-1} \Phi_i \overline{P}_{i,k} (I - \overline{P}_{k,k})^{-1}, \; k \geq 1,$$

матрицы $\overline{P}_{i,l}$, $l \geq 0, i = \overline{0,k}$, определяются равенствами

$$\overline{P}_{i,l} = \sum_{k=l}^{\infty} P_{i,k} G^{k-l}, \; l \geq 0, i = \overline{0,k},$$

а вектор $\overline{\pi}_0$ есть решение системы уравнений

$$\overline{\pi}_0 (I - \overline{P}_{0,0}) = \overline{0}, \tag{2.21}$$

$$\overline{\pi}_0 \sum_{i=0}^{\infty} \Phi_i \overline{1}_2 = 1, \tag{2.22}$$

где $\overline{1}_2 = (1,2,1,1,1,1,1)^t$..

Заметим, что (2.22) получено из условия нормировки

$$\sum_{i=0}^{\infty}\left[\pi(i,1,1')+\pi(i,2,2')+\pi(i,2',2')+\sum_{r=1}^{2}(\pi(i,r,r)+\pi(i,2',r)+\pi(i,1',r))\right]=1,$$

которое с учетом равенств (2.3) и (2.20) принимает вид (2.22).

2.1.4 Стационарное распределение вероятностей состояний системы в произвольный момент времени

Под состоянием системы в произвольный момент времени $t \ge 0$ будем понимать состояние процесса $\overline{X}_t = \{i_t, m_t\},\ t \ge 0,$ где i_t - число заявок в системе в момент времени *t*, m_t - состояние обслуживающего прибора, $m_t \in \{1,1',2,2'\}$.

Стационарное распределение вероятностей состояний системы в произвольный момент времени определяется как предельное распределение процесса $\overline{X}_t,\ t \ge 0$. Процесс $\overline{X}_t,\ t \ge 0$ является полурегенерирующим процессом с вложенным процессом марковского восстановления $\{i_n, t_n\},\quad n \ge 1$ (см. [40]). На основании результатов работы [40] достаточным условием существования стационарных вероятностей

$$p(i,m) = \lim_{t\to\infty} P\{i_t = i, m_t = m\},\ i \ge 0, m \in \{1,1',2,2'\}$$

является существование стационарного распределения вложенной цепи Маркова $X_n,\ n \ge 1$, а стационарные вероятности $p(i,m),\ i \ge 0$, состояний системы в произвольный момент времени определяются следующими равенствами:

$$p(i,r) = \lambda(\pi(0,r,r)+\pi(0,1',r)+\pi(0,2',r))\left(s_r\,\bar{f}_{i-1}+\frac{p_r I_{\{i=0\}}}{\lambda+\gamma_r^{(1)}}+\frac{(1-p_r)I_{\{i=0\}}}{\lambda+\gamma_r^{(2)}}\right)+$$

$$+\lambda\sum_{k=1}^{i}(\pi(k,r,r)+\pi(k,1',r)+\pi(k,2',r))\bar{f}_{i-k},\ i \ge 0, r=1,2,$$

$$p(i,1') = \lambda\sum_{k=0}^{i}\pi(k,1,1)\overline{h}_{i-k},\ i \ge 0,$$

$$p(i,2') = \lambda(\pi(0,2',2')+\pi(0,2,2'))\left(\frac{\lambda\overline{g}_{i-1}}{\lambda+Q_1}+\frac{I_{\{i=0\}}}{\lambda+Q_1}\right)+$$

$$+\lambda\sum_{k=1}^{i}(\pi(k,2',2')+\pi(k,2,2'))\overline{g}_{i-k},\ i \ge 0,$$

где

$$\bar{f}_i^{(r)} = \int_0^\infty \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t} e^{-\mu_r t} \left(p_r e^{-\gamma_r^{(1)} t} + (1-p_r) e^{-\gamma_r^{(2)} t} \right) dt =$$

$$= p_r \frac{\lambda^i}{(\gamma_r^{(1)} + \mu_r + \lambda)^{i+1}} + (1-p_r) \frac{\lambda^i}{(\gamma_r^{(2)} + \mu_r + \lambda)^{i+1}}, \; r = 1,2,$$

$$\bar{h}_i^{(r)} = \int_0^{Q_2} \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t} \left(p_2 e^{-\gamma_2^{(1)} t} + (1-p_2) e^{-\gamma_2^{(2)} t} \right) dt =$$

$$= \frac{p_2 \lambda^i}{(\gamma_2^{(1)} + \lambda)^{i+1}} - p_2 \lambda^i \sum_{m=0}^{i} \frac{Q_2^m}{m!(\lambda + \gamma_2^{(1)})^{i-m+1}} e^{-\lambda Q_2} e^{-\gamma_2^{(1)} Q_2} +$$

$$+ \frac{(1-p_2)\lambda^i}{(\gamma_2^{(2)} + \lambda)^{i+1}} - (1-p_2)\lambda^i \sum_{m=0}^{i} \frac{Q_2^m}{m!(\lambda + \gamma_2^{(2)})^{i-m+1}} e^{-\lambda Q_2} e^{-\gamma_2^{(2)} Q_2},$$

$$\bar{g}_i = \int_0^\infty \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t} e^{-\mu_2 t} e^{-Q_1 t} dt = \frac{\lambda^i}{(\lambda + \mu_2 + Q_1)^{i+1}}, \; i \ge 0.$$

2.1.5 Условия существования стационарного режима

Для установления условий существования стационарного режима представим рассматриваемую систему как систему с отдыхами обслуживающего прибора, в которой под отдыхом прибора понимается время между моментами, когда завершился первый режим работы до следующего момента, когда система переключилась на первый режим. Заметим, что дисциплина обслуживания заявок в системе - ограниченная (время обслуживания очереди ограничено значением случайной величины ξ_1).

Для систем с отдыхами обслуживающего прибора необходимое и достаточное условие существования стационарного режима получено в работе [41] и имеет вид

$$\rho_1 + \lambda V / M < 1, \tag{2.23}$$

где $\rho_1 = \lambda / \mu_1$, V - средняя длительность отдыха, M - среднее максимальное число заявок, которые могут быть обслужены в очереди между соседними отдыхами. Заметим, что поскольку для системы в [41] обслуживания заявок во время отдыха прибора не производится (а в нашем случае - наоборот), то условие (2.23) будет достаточным для существования стационарного режима рассматриваемой системы.

Величина M определяется как

$$M = \mu_1 \left(\frac{\rho_1}{\gamma_1^{(1)}} + \frac{1-\rho_1}{\gamma_1^{(2)}} \right).$$

Найдем теперь среднюю длительность отдыха V:

$$V = w_1 V_{1',1} + (1 - w_1)(V_{1',2} + V_2 + V_{2'}),$$

где

$$w_1 = 1 - p_2 e^{-\gamma_2^{(1)} Q_2} - (1 - p_2) e^{-\gamma_2^{(1)} Q_2}$$

- вероятность того, что переключение с первого режима на второй завершилось переходом на второй режим,

$$V_{1',1} = \frac{p_2}{\gamma_2^{(1)}} + \frac{1 - p_2}{\gamma_2^{(2)}}$$

- средняя длительность переключения с первого режима на второй, которое завершилось переходом на первый режим,

$V_{1',2} = Q_2$ - средняя длительность переключения с первого режима на второй, которое завершилось переходом на второй режим,

$$V_2 = \frac{p_2}{\gamma_2^{(1)}} + \frac{1 - p_2}{\gamma_2^{(2)}}$$

- средняя длительность второго режима,

$V_{2'}$ - средняя длительность переключения со второго режима на первый (с учетом возможных "возвратов" на второй режим), которое завершилось переходом на первый режим.

Найдем величину $V_{2'}$. С вероятностью α имеем: $V_{2'} = \frac{1}{Q_1}$. Напомним, что α - вероятность того, что переключение со второго режима на первый завершается переходом на первый режим. С вероятностью $(1-\alpha)^{m-1}\alpha$ за время от момента завершения второго режима до перехода на первый последует m-1 "возвратов" на второй режим, и на m-м переключении произойдет переход на первый режим, $m \geq 2$. Средняя длительность такого периода равна

$$\sum_{m=2}^{\infty} \left(\frac{m}{Q_1} + (m-1) V_2 \right) (1-\alpha)^{m-1} \alpha,$$

и таким образом,

$$V_{2'} = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{1}{Q_1} + V_2 (1-\alpha) \right).$$

Далее получаем, что средняя длительность отдыха V определяется равенством

$$V = w_1 \left(\frac{p_2}{\gamma_2^{(1)}} + \frac{1 - p_2}{\gamma_2^{(2)}} \right) + (1 - w_1) \left(Q_2 + \frac{1}{\alpha Q_1} + \frac{V_2}{\alpha} \right).$$

Таким образом, получаем следующий результат.

Утверждение. *Для существования стационарного режима в рассматриваемой системе достаточно, чтобы*

$$\rho_1 + \rho_1 V\left(\frac{p_1}{\gamma_1^{(1)}} + \frac{1-p_1}{\gamma_1^{(2)}}\right)^{-1} < 1.$$

2.1.6 Характеристики производительности системы

Вычислив стационарное распределение вероятностей состояний системы в произвольный момент времени, находим характеристики производительности:

- Доля времени, в течение которого система работает в *r*-м режиме:

$$q_r = \sum_{i=0}^{\infty} p(i,r), \;\; r = 1,2.$$

- Среднее число заявок в системе при ее работе в *r*-м режиме

$$L_r = \sum_{i=0}^{\infty} ip(i,r), \;\; r \in \{1,1',2,2'\}.$$

- Среднее число заявок в системе в произвольный момент времени

$L = L_1 + L_{1'} + L_2 + L_{2'}$.

- Среднее время пребывания заявки в системе (вычисляется по формуле Литтла)

$T = L / \lambda$.

2.1.7 Математическая модель гибридного беспроводного канала связи с параллельным использованием радиоканала (горячий резерв радиоканала в Е-диапазоне 71-76 ГГц и 81-86 ГГц)

При работе атмосферного оптического канала связи возможно также параллельное использование обоих каналов (лазерного и радио канала). В данном разделе рассматривается модель параллельного использования каналов связи как система массового обслуживания с двумя неоднородными приборами.

Предполагаем, что поток заявок в систему является простейшим с параметром λ. Система имеет два обслуживающих прибора, времена обслуживания на которых имеют экспоненциальное распределение с параметрами μ_1 и μ_2, соответственно.

Предполагаем также, что второй прибор является абсолютно надежным, а работа первого прибора (оптического канала) представляет собой чередующиеся промежутки доступности и недоступности канала. Эти периоды описываются абсолютно непрерывными случайными величинами ξ_1 и ξ_2, соответственно. Случайная величина ξ_k имеет плотность гиперэкспоненциального распределения второго порядка

$$F_k(t) = p_k \gamma_1^k e^{-\gamma_1^k t} + (1-p_k)\gamma_2^k e^{-\gamma_2^k t},$$

параметры которого определены с помощью подхода, описанного в разделе 1, $k = 1,2$.

Если в течение времени обслуживания заявки на первом приборе (передачи пакета по оптическому каналу) канал становится недоступным, то обслуживание заявки прерывается, и она помещается на второй прибор, если он свободен, или становится во главе очереди и будет обслужена первой, когда второй прибор освободится, либо когда первый прибор станет доступным (в зависимости от того, какое из двух событий произойдет раньше).

2.1.8 Марковский процесс, описывающий состояния системы, и условия эргодичности

Рассмотрим случайный процесс

$$X(t) = \left(i(t), c_1(t), c_2(t)\right), \ t \geq 0,$$

где $i(t)$ - число заявок в системе в момент времени t , $c_1(t)$ и $c_2(t)$ - состояния приборов: $c_{\bullet}(t) = 0$, когда прибор свободен, $c_{\bullet}(t) = 1$, когда прибор занят, $c_1(t) = *$, когда прибор отключен (заметим, что это состояние имеет место лишь для первого прибора).

Случайный процесс $X(t), \ t \geq 0,$ является марковским и описывает состояния системы в произвольный момент времени.

Инфинитезимальный генератор процесса $X(t), \ t \geq 0,$ имеет следующую блочную структуру:

$$Q = \begin{pmatrix} Q_0 & A_0 & O & O & O & \dots \\ B_0 & Q_1 & A_1 & O & O & \dots \\ O & B_1 & \overline{Q} & A & O & \dots \\ O & O & B & Q & A & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \ddots & \ddots & \ddots \end{pmatrix},$$

где

$$Q_0 = \begin{pmatrix} -(\lambda+\gamma_1) & \gamma_1 \\ \gamma_2 & -(\lambda+\gamma_2) \end{pmatrix}, \ \overline{Q} = \begin{pmatrix} -(\lambda+\mu_1+\mu_2+\gamma_1) & \gamma_1 \\ \gamma_2 & -(\lambda+\mu_2+\gamma_2) \end{pmatrix},$$

$$Q_1 = \begin{pmatrix} -(\lambda+\mu_1+\gamma_1) & 0 & \gamma_1 \\ 0 & -(\lambda+\mu_2+\gamma_1) & \gamma_1 \\ 0 & \gamma_2 & -(\lambda+\mu_2+\gamma_2) \end{pmatrix},$$

$$B_0 = \begin{pmatrix} \mu_1 & 0 \\ \mu_2 & 0 \\ 0 & \mu_2 \end{pmatrix}, \ B_1 = \begin{pmatrix} \mu_2 & \mu_1 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_2 \end{pmatrix}, \ B = \begin{pmatrix} \mu_1+\mu_2 & 0 \\ 0 & \mu_2 \end{pmatrix},$$

$$A_0 = \begin{pmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{pmatrix},\ A_1 = \begin{pmatrix} \lambda & 0 \\ \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix},\ A = \begin{pmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix},$$

$$\gamma_r = p_r \gamma_r^{(1)} + (1 - p_r)\gamma_r^{(2)},\ r = 1,2.$$

На основании результатов работы [42] критерием эргодичности марковского процесса $X(t),\ t \ge 0,$ является выполение неравенства

$$\overline{\pi} A \overline{e} < \overline{\pi} B \overline{e}, \tag{2.24}$$

где $\overline{e} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$, а $\overline{\pi}$ - вектор-строка стационарных вероятностей случайного процесса с инфинитезимальным генератором, определяемым матрицей

$$A + \overline{Q} + B = \begin{pmatrix} -\gamma_1 & \gamma_1 \\ \gamma_2 & -\gamma_2 \end{pmatrix}.$$

Вектор $\overline{\pi}$ определяется как решение системы уравнений

$$\overline{\pi}(A + \overline{Q} + B) = \overline{0},\quad \overline{\pi}\overline{e} = 1$$

и имеет вид $\overline{\pi} = \begin{pmatrix} \dfrac{\gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2} & \dfrac{\gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2} \end{pmatrix}$.

Таким образом, критерий эргодичности (24) принимает следующий вид:

$$\frac{\lambda(\gamma_1 + \gamma_2)}{\mu_1 + \mu_2} < \gamma_2 + \frac{\gamma_1 \mu_2}{\mu_1 + \mu_2}. \tag{2.25}$$

2.1.9 Стационарное распределение марковского процесса, описывающего состояния системы

Предположим, что условие (2.25) выполнено и система функционирует в стационарном режиме. Введем стационарные вероятности марковского процесса $X(t),\ t \ge 0,$

$$\pi_{xy}(i) = \lim_{t \to \infty} P\{i(t) = i, c_1(t) = x, c_2(t) = y\},\ i \ge 0, x, y \in \{0,1\},$$
$$p_y(i) = \lim_{t \to \infty} P\{i(t) = i, c_1(t) = *, c_2(t) = y\},\ i \ge 0, y \in \{0,1\}.$$

Стационарные вероятности удовлетворяют следующей системе уравнений равновесия:

$$\pi_{00}(0)(\lambda + \gamma_1) = p_0(0)\gamma_2 + \pi_{10}(0)\mu_1 + \pi_{01}(0)\mu_2,$$
$$\pi_{10}(0)(\lambda + \mu_1 + \gamma_1) = \pi_{00}(0)\lambda + \pi_{11}(0)\mu_2,$$
$$\pi_{01}(0)(\lambda + \mu_2 + \gamma_1) = p_1(0)\gamma_2 + \pi_{11}(0)\mu_1,$$
$$\pi_{11}(i)(\lambda + \mu_1 + \mu_2 + \gamma_1) = \pi_{11}(i-1)\lambda I_{\{i>0\}} + p_1(i+1)\gamma_2 +$$
$$+ \pi_{11}(i+1)(\mu_1 + \mu_2) + (\pi_{10}(0) + \pi_{01}(0))\lambda I_{\{i=0\}},\ i \ge 0,$$

$$p_0(0)(\lambda+\gamma_2)=p_1(0)\mu_2+\pi_{00}(0)\gamma_1,$$
$$p_1(i)(\lambda+\mu_2+\gamma_2)=\pi_{11}(i-1)\gamma_1 I_{\{i>0\}}+p_1(i-1)\lambda I_{\{i>0\}}+p_1(i+1)\mu_2+$$
$$+p_0(0)\lambda I_{\{i=0\}}+(\pi_{10}(0)+\pi_{01}(0))\gamma_1 I_{\{i=0\}},\ i\ge 1.$$

Введем векторы стационарных вероятностей

$$\overline{\pi}_0=(\pi_{00}(0),\ p_0(0)),\ \ \overline{\pi}_1=(\pi_{10}(0),\pi_{01}(0),\ p_1(0)),$$
$$\overline{\pi}_2=(\pi_{11}(0),\ p_1(1)),...,\ \overline{\pi}_i(\pi_{11}(i-2),\ p_1(i-1)),\ \ i\ge 2,$$

где нижний индекс означает общее число заявок в системе (включая заявки на приборах).

Перепишем уравнения равновесия в векторно-матричной форме

$$\begin{aligned}&\overline{\pi}_0 Q_0=\overline{\pi}_1 B_0,\\&\overline{\pi}_1 Q_1=\overline{\pi}_0 A_0+\overline{\pi}_2 B_1,\\&\overline{\pi}_2\overline{Q}=\overline{\pi}_1 A_1+\overline{\pi}_3 B,\\&\overline{\pi}_i\overline{Q}=\overline{\pi}_{i-1}A+\overline{\pi}_{i+1}B,\ i\ge 3.\end{aligned}\tag{2.26}$$

Предположим, что $\overline{\pi}_i=\overline{\pi}_0 F_i,\ i\ge 1,$ тогда из равенств (2.26) следует, что матрицы $F_i,\ i\ge 0,$ могут быть вычислены следующим образом:

$$F_0=E_2,\ F_1=A_0(-Q_1-A_1G_1)^{-1},\ F_2=F_1A_1(-\overline{Q}-AG)^{-1},$$
$$F_i=F_{i-1}A(-\overline{Q}-AG)^{-1},\ i\ge 3,$$

где E_2 - единичная матрица размера 2, матрицы G_0 и G_1 определяются как

$$G_1=(-\overline{Q}-AG)^{-1}B_1,\ G_0=(-Q_1-A_1G_1)^{-1}B_0,$$

а матрица G находится как решение матричного уравнения:

$$B+\overline{Q}G+AG^2=O.\tag{2.27}$$

Матричное уравнение (2.27) может быть решено с помощью итерационной схемы

$$G^{(0)}=E_2,$$
$$G^{(k)}=-\overline{Q}^{-1}\left(A(G^{(k-1)})^2+B\right),\ k\ge 1,$$

а матрица G определяется как предел $G=\lim_{k\to\infty}G^{(k-1)}$.

2.1.10 Характеристики производительности системы

Вычислив стационарное распределение вероятностей состояний системы, можно найти следующие характеристики производительности:

1. Доля использования первого прибора (по отношению к общему числу обслуженных заявок)

$$P_1=\sum_{i=0}^{\infty}\left(\pi_{10}(i)+\pi_{11}(i)\frac{\mu_1}{\mu_1+\mu_2}\right)\frac{1}{1-\pi_{00}(0)}.$$

2. Доля использования второго прибора

$P_2 = 1 - P_1$.

3. Среднее число заявок, обслуженных i-м прибором

   $N_i = \lambda P_i, \quad i = 1,2.$

4. Среднее число заявок в очереди

   $$L_q = \sum_{i=1}^{\infty} i\left(\pi_{11}(i) + \pi_{01}(i) + \pi_{10}(i) + p_1(i) + p_0(i)\right).$$

5. Среднее число заявок в системе

   $$L = \sum_{i=1}^{\infty} i\overline{\pi}_i\overline{e}.$$

6. Среднее время ожидания в системе (вычисляется по формуле Литтла)

   $$W = \frac{L_q}{\lambda}.$$

2.2 Разработка машинной (имитационной) модели гибридного канала

Имитационная модель гибридного канала связи написана на высокоуровневом, кросс-платформенном, объектно-ориентированном языке программирования Java 5. Особенности языка позволяют выполнять моделирование на компьютерах с различными архитектурами и под различными операционными системами. Для запуска модели на компьютере должна быть установлена Java-машина, которая может быть бесплатно скачана с сайта разработчика. Входные параметры для модели задаются в текстовом конфигурационном файле. Модель выводит результаты в виде текстовых файлов и наборов сценариев, при исполнении которых в пакете прикладных программ для решения задач технических вычислений – Matlab строятся графики, отображающие характеристики канала связи. В качестве выходных показателей модели используются следующие характеристики канала связи: недоступность (%), пропускная способность (Мбит/с), число переключений между режимами (переключений в день), средняя и максимальная длины очереди (пакетов), а также среднее и максимальное времена пребывания пакета в системе.

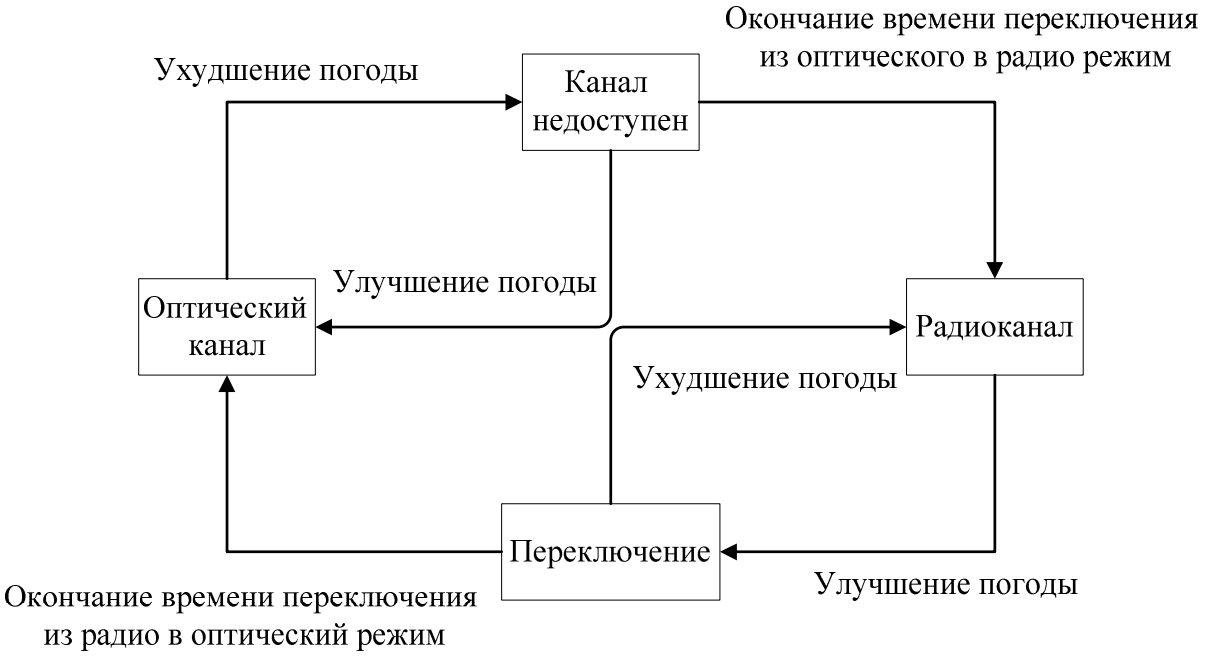

Рисунок 2.1. Блок-схема состояний канала в имитационной модели

В имитационной модели канал связи может находиться в одном из четырех состояний и переходить между ними при выполнении определенных условий. Блок-схема данных состояний с переходами представлена на Рисунке 2.1.

В имитационной модели также моделируется поведение стационарного пуассоновского потока с параметром λ, размер пакета, а, следовательно, и время его обслуживания, имеют экспоненциальное распределение.

Так как длительности интервалов работы оптического и резервного (радио) канала превышают минуты, а время обслуживания одного пакета занимает доли секунд, то для сбора статистики, учитывающей переключение канала между режимами, нужно смоделировать как минимум месяцы работы канала. Однако за это время через системы проходит такое количество заявок, что при моделировании прохождения каждой из них время выполнения имитации займет часы. Поэтому в модели используется стохастическая оценка поведения системы M/M/1 в длительные промежутки стационарной работы одного из каналов связи.

Когда во время работы оптического или радиоканала очередь системы опустошается (допустим, в момент t_1), в модели определяется момент (t_2), когда в следующий раз изменение погодных условий приводит к изменению режима работы канала. Если в интервале времени (t_1, t_2) укладывается не менее одного (N) среднего периода регенерации системы $T = 1 / \lambda + 1 / (\mu - \lambda)$, то в интервале времени (t_1, $t_1 + N*T$) средняя длина очереди (q) и среднее время пребывания пакета в системе (W) находятся по формулам [43] $q = \rho / (1$

– ρ), где ρ = λ / μ и по формуле Литтла W = q / λ. Иллюстрация расположения данных интервалов в имитационной модели приведена на Рисунке. 2.2.

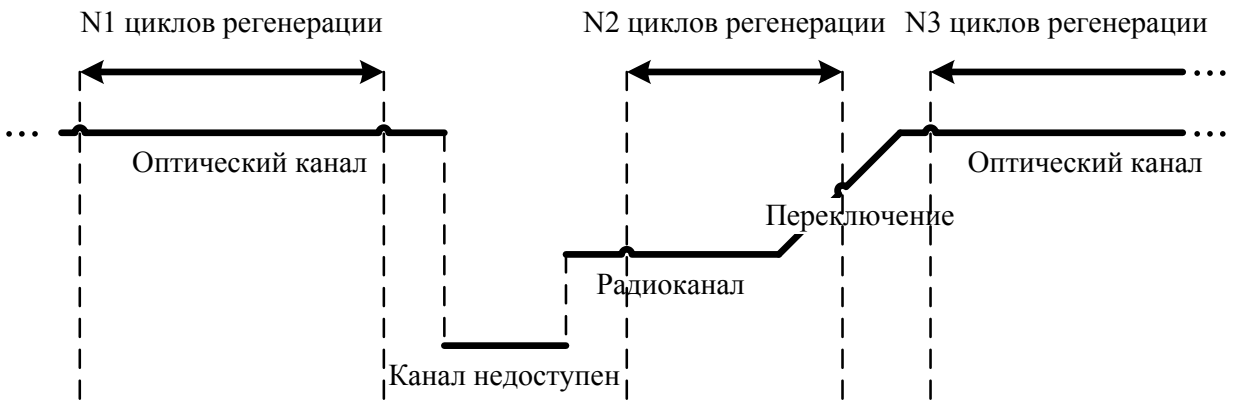

Рисунок 2.2. Схема имитационного моделирования

2.3 Проведение патентных исследований по ГОСТ 15.011-96

2.3.1 Технический уровень и тенденции развития

На 2-ом этапе НИР проведены необходимые патентные исследования по определению патентно-лицензионной ситуации на рынке высоких беспроводных технологий, по определению технического уровня разрабатываемой в России и за рубежом новой аппаратуры гибридных каналов связи на базе лазерной и радио технологий; по определению их охраноспособности и конкурентоспособности, а также по прогнозированию дальнейшего развития разрабатываемых технических систем беспроводной радиосвязи.

Патентный поиск (с глубиной поиска в 10 лет) с целью проверки разрабатываемого средства на патентную чистоту был проведен по странам: РФ, США, Франция, Япония, Германия, Великобритания. При этом особое внимание уделялось следующим фирмам: Atheros; Metrix Com LLC; Infinet wireless (Comptec aqua- Комптек); Cisco Sys (Aironet Co); Intersil Corporation; Proxim Wireless Network; Wilan wireless; Intel Corporation; Microsoft Corporation; Qualcomm Inc; Alcatel-Lucent; RarNet; AT&T; NCR; LightPointe Communications Inc.; Alvarion (BreezeCom); Wp media Inc.

2.3.2 Предложения по использованию результатов патентных исследований

Анализ существующих устройств гибридной связи на рынке беспроводных технологий и поиск по фирмам, выпускающих аналогичные устройства, охраноспособность которых уже защищена патентами, позволяет выбрать варианты наиболее близких аналогов к разрабатываемому средству и выделить ряд его отличительных особенностей, что в свою очередь составляет предмет изобретения.

Разрабатываемая система гибридной беспроводной связи на базе лазерной и радио технологии имеет в своем составе:

- лазерные приемо-передатчики, образующие атмосферную оптическую линию связи;

- параллельно работающую с ЛАЛС радиолинию, функционирующую в миллиметровом диапазоне радиоволн (горячий резерв);

- резервную радиолинию на базе стандарта IEEE 802.11n и технологии MIMO, работающую в холодном режиме.

Разработка указанной системы беспроводной связи обеспечивает повышение вероятности гарантированной связи в сложных метеоусловиях при одновременном снижении затрат на эксплуатацию, а также повышение экологической безопасности беспроводной связи.

Разработка такой системы гибридной связи предположительно является предметом предполагаемого изобретения.

Полный отчет о патентных исследованиях приведен в Приложении 1.

Разрабатываемый способ организации высокоскоростной линии связи операторской надежности имеет ряд отличительных особенностей, которые могут быть защищены патентами РФ.

Результаты патентных исследований могут быть использованы в документации, связанной с обеспечением охраны объекта промышленной собственности в стране и за рубежом.

2.4 Проведение статистической обработки метеоданных и отыскание функции распределения периодов доступности и недоступности атмосферного оптического канала

В опубликованных до настоящего времени работах, посвященных качеству сигнала открытого оптического атмосферного канала (ОАК) и исследованию характеристик погодных явлений, влияющих на доступность оптического канала, оценивается лишь вероятность того, что метеорологическая дальность видимости (МДВ) ниже некоторого значения. Однако, в действительности важно не только то, какую долю времени МДВ ниже

некоторого показателя, но и то, как часто происходит смена погодных условий, приводящая к переходу гибридного канала связи между оптическим и радио режимами работы. Известно также, что на доступность оптического канала влияет множество других факторов, не связанных с МДВ, таких как сцинтилляция, юстировка, колебания опоры, влияние солнца и др. Помимо перечисленных факторов, связанных с атмосферой и погодными явлениями, огромное значение имеет непосредственно конструкция приемопередатчика: длина оптической волны, количество лучей, расходимость луча, чувствительность приемника и мощность передатчика, наличие системы автоматического наведения и др. Таким образом, очевидно, что невозможно создать модель, достаточно точно учитывающую все перечисленные характеристики гибридного канала связи, поэтому для оценки характеристик разрабатываемого гибридного канала был проведен продолжительный натурный эксперимент, позволивший получить данные для оценки времен доступности и недоступности оптического канала связи для данного конкретного оборудования и протяженности канала связи 4,5 км, расположенного в Рязанской области.

Полученные в натурном эксперименте длительности работы резервного и оптического атмосферного (ОАК) каналов приведены на Рисунке 2.3 и Рисунке 2.4. Вместе с двумя функциями аппроксимирующими полученное распределение. Из графиков видно, что экспоненциальное распределение, построенное по среднему значению функции, является плохой аппроксимацией времен доступности канала, в то время как гиперэкспоненциальное распределение, построенное по первому и второму начальным моментам, хорошо совпадает с экспериментальными данными.

Для построения гиперэкспоненциального распределения для выборки данных $\{X_1, X_2, ..., X_N\}$ (например, периодов доступности) используем следующий подход [18].

Вычисляем первые три начальных момента m_1, m_2, m_3 по формулам

$$m_i = \frac{1}{Ni!}\sum_{k=1}^{N} X_k^i, \quad i = 1,2,3.$$

Определяем величины

$$f_1 = \frac{m_3 - m_1 m_2}{m_2 - (m_1)^2}, \qquad f_2 = \frac{m_1 m_3 - (m_2)^2}{m_2 - (m_1)^2}.$$

Если выполнены неравенства

$$m_2 > m_1^2, m_3 > m_1 m_2, m_1 m_3 > m_2^2, \ f_i^2 > 4 f_2,$$

то параметры p, γ_1, γ_2 гиперэкспоненциального распределения с плотностью вида

$$F(t) = p\gamma_1 e^{-\gamma_1 t} + (1-p)\gamma_2 e^{-\gamma_2 t}$$

определяются следующим образом:

$$\gamma_1 = \frac{2}{f_1 + \sqrt{f_1^2 - 4f_2}}, \ \gamma_2 = \frac{2}{f_1 - \sqrt{f_1^2 - 4f_2}}, \ p = \frac{\gamma_1(\gamma_2 m_1 - 1)}{\gamma_1 - \gamma_2}.$$

В противном случае (если хотя бы одно из неравенств не выполнено) параметры находятся из условий

$$p \neq \frac{(m_1)^2}{m_2}, \ 0 < p < 1 \ \ и \ \ m_1\gamma_2 - 1 + p > 0,$$

где

$$\gamma_1 = \frac{p\gamma_2}{m_1\gamma_2 - 1 + p}, \ \gamma_2 = \frac{m_1(1-p) - \sqrt{(1-p)p(m_2 - (m_1)^2)}}{(m_1)^2 - m_2 p},$$

а величина p выбирается таким образом, чтобы минимизировать разность

$$\left| \frac{p}{(m_1)^3} + \frac{1-p}{8(m_1)^3} - m_3 \right|.$$

Таким образом, считаем, что для выбранного устройства при протяженности канала 4,5 км и расположении его в Рязанской области времена доступности и недоступности ОАК имеют гиперэкспоненциальное распределение

$$F(t) = p\gamma_1 e^{-\gamma_1 t} + (1-p)\gamma_2 e^{-\gamma_2 t}$$

где параметры для интервалов работы оптического и резервного каналов приведены на графиках.

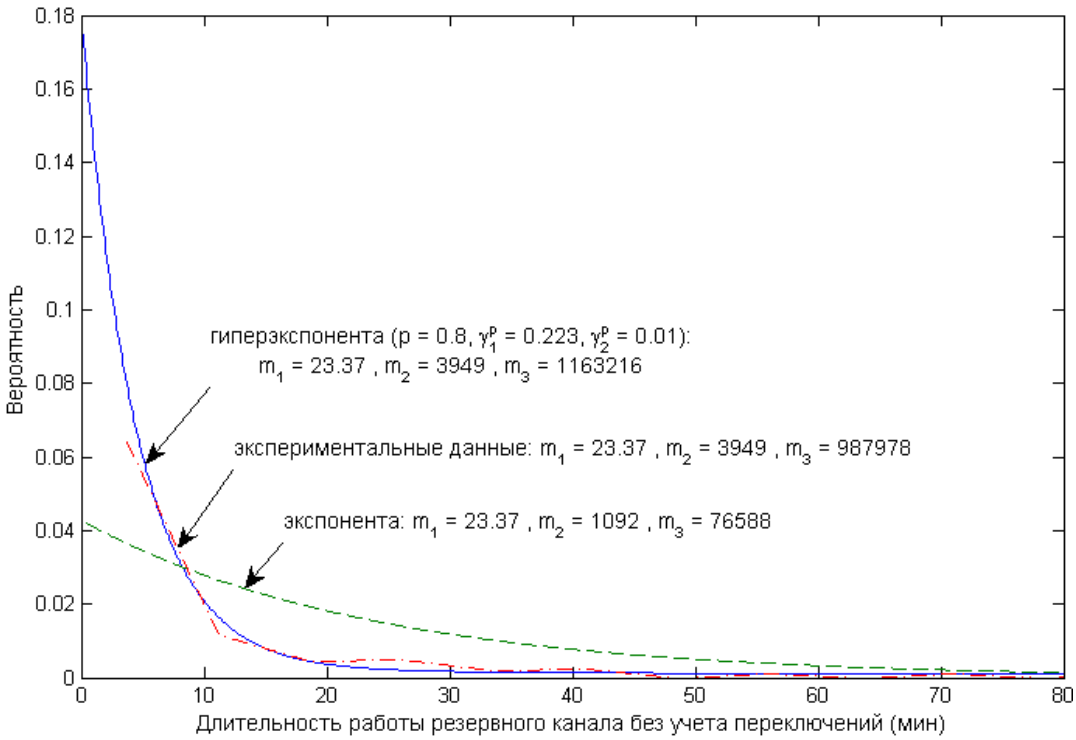

Рисунок 2.3. Экспериментально полученная длительность работы резервного канала и ее аппроксимация

Для построения функций распределения для канала произвольной длины можно воспользоваться формулой $W(L) = a_i L^{b_i}$, где W(L) вероятность наступления погодных условий, при которых МДВ меньше расстояния L (км); a_i, b_i - константы для конкретной географической точки, которая предложена в работе [33]. Исходя из пропорциональности длины канала и МДВ, при которой оптический канал становится недоступен, можно вывести формулу для параметров распределения длительности работы резервного канала произвольно длины:

$$\gamma_i^p(l) = \gamma_i^p(l_0)\left(\frac{l_0}{l}\right)^b,$$

где i = 1,2, b = 1.46 для Рязанской области, l_0 = 4.5 км, l – протяженность канала в километрах, а $\gamma_i^p(l_0)$ – параметры гиперэкспоненциального распределения длительности работы резервного канала протяженностью 4.5 км, которые приведены на Рисунке 2.3 в минутах.

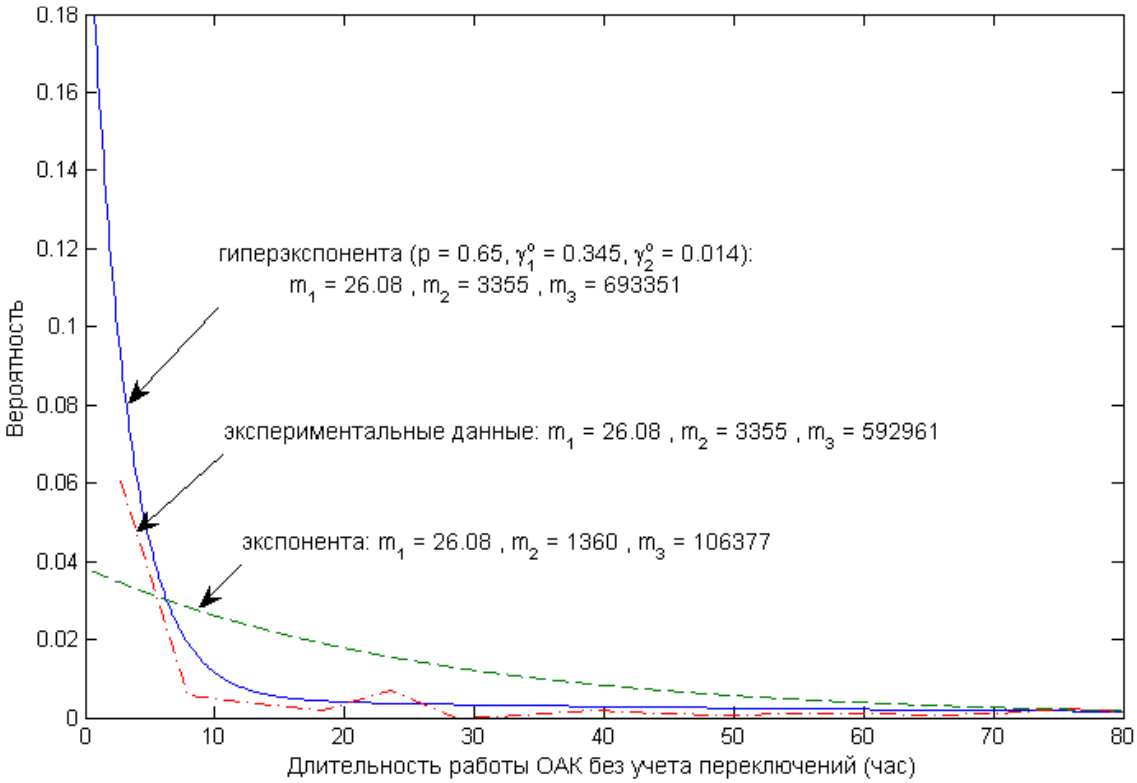

Рисунок 2.4. Экспериментально полученная длительность работы оптического атмосферного канала и ее аппроксимация

Так как при изменении длительности работы резервного канала изменяется длительность работы оптического, то будем считать, что зависимость параметров распределения длительности работы ОАК имеет следующий вид:

$$\gamma_i^o(l) = \gamma_i^o(l_0)\left(\frac{l}{l_o}\right)^b,$$

где – параметры гиперэкспоненциального распределения длительности работы ОАК протяженностью 4.5 км, которые приведены на Рисунке 2.2 в часах.

Предложенная методика позволяет определить искомые характеристики канала в произвольном регионе, на основе статистики собранной в натурном эксперименте на канале фиксированной длины.

Полученная в данном разделе функция распределения времен доступности и недоступности оптического канала используется при построении имитационной и аналитической модели гибридного канала.

3. Разработка пакета прикладных программ. Выбор оптимальных параметров и сравнительный анализ вариантов построения гибридного канал

3.1 Разработка комплекса программных средств аналитического и имитационного моделирования гибридного канала связи

3.1.1 Общее описание пакета программ аналитического и машинного гибридного канала связи

В соответствии с планом исследований разработан пакет программ, предназначенный для численного расчета характеристик гибридной системы основанной на атмосферном оптическом канале связи и резервных каналах миллиметрового и сантиметрового диапазона радиоволн. Программный комплекс объединяет несколько математических моделей, а так же ряд имитационных моделей, описание которых приведено в предыдущих отчетах. Модели позволяют рассчитать основные характеристики гибридной системы, такие как:

- Среднюю пропускную способность системы
- Среднее время доступности каналов
- Среднее время задержки пакета с данными

Программный комплекс реализован с помощью языка программирования Java и, следовательно, является платформонезависимым. Для своего запуска комплекс требует наличие установленной на компьютере java-машины не ниже версии 1.6. Для графического пользовательского интерфейса используется библиотека Swing.

Для осуществления расчетов, пользователь должен выбрать тип эксперимента и модель, которая будет использоваться в очередном эксперименте. Кроме того, необходимо задать ряд других характеристик гибридной системы и окружающей среды, параметры которых участвуют в расчетах. Полный список входных параметров можно увидеть в соответствующем разделе данного отчета.

Следующие модели представлены в настоящей версии пакета программ:

Аналитические модели:

- Гибридная система с холодным резервом (радиоканал IEEE 802.11n)
- Гибридная система с горячим резервом (радиоканал миллиметрового диапазона радиоволн)

Имитационные модели:

- Гибридная система с холодным резервом
- Гибридная система с горячим резервом
- Гибридный канал с двумя резервными радиоканалами: канал миллиметрового диапазона в горячем резерве; канал IEEE 802.11n – в холодном).

Под холодным резервом понимается режим, когда работает только один из каналов и переключение между каналами происходит при изменении погодных условий. В горячем режиме радиоканал работает всегда, позволяя увеличить пропускную способность при хорошей погоде, когда оптический канал доступен.

Кроме того, программный комплекс поддерживает следующие типы экспериментов:

- Одноразовый обсчет модели
- Усреднение по нескольким итерациям (только для имитационного моделирования)
- Расчет модели при варьировании интенсивности входящих пакетов
- Расчет модели при варьировании времен переключения между каналами
  - Время переключения с оптического канала на радиоканал
  - Время переключения с радиоканала на оптический канал
  - Варьирование обоих параметров
- Расчет модели при варьировании параметров погоды
  - Параметры плохой погоды
    - Вероятность p в гиперэкспоненциальном
    - Средняя продолжительность плохой погоды $\gamma^{(1)}$ с вероятностью p
    - Средняя продолжительность плохой погоды $\gamma^{(2)}$ с вероятностью 1-p
    - Одновременное варьирование параметров $\gamma^{(1)}$ и $\gamma^{(2)}$ для плохой погоды
  - Параметры хорошей погоды
    - Вероятность p в гиперэкспоненциальном
    - Средняя продолжительность плохой погоды $\gamma^{(1)}$ с вероятностью p
    - Средняя продолжительность плохой погоды $\gamma^{(2)}$ с вероятностью 1-p

- Одновременное варьирование параметров $\gamma^{(1)}$ и $\gamma^{(2)}$ для хорошей погоды

Важно отметить, что во всех типах экспериментов для имитационных моделей, кроме итераций по варьированию параметра выбранного в данном эксперименте, проводятся также итерации с неизменными параметрами, для усреднения полученных результатов. Количество итераций для усреднения результатов можно задавать во входных параметрах.

Основные блоки представленного программного комплекса перечислены ниже:

- Графического пользовательского интерфейса
- Функциональный блок для обсчета математических моделей
- Функциональный блок для имитационного моделирования

Так же есть несколько вспомогательных блоков, которые более подробно будут описаны в следующей главе.

3.1.2 Архитектура пакета прикладных программ

Данная глава описывает высокоуровневую архитектуру пакета программ, а также функциональность каждого из блоков.

На Рисунке 3.1 ниже представлены основные функциональные блоки пакета программ, а также интерфейсы взаимодействия между ними.

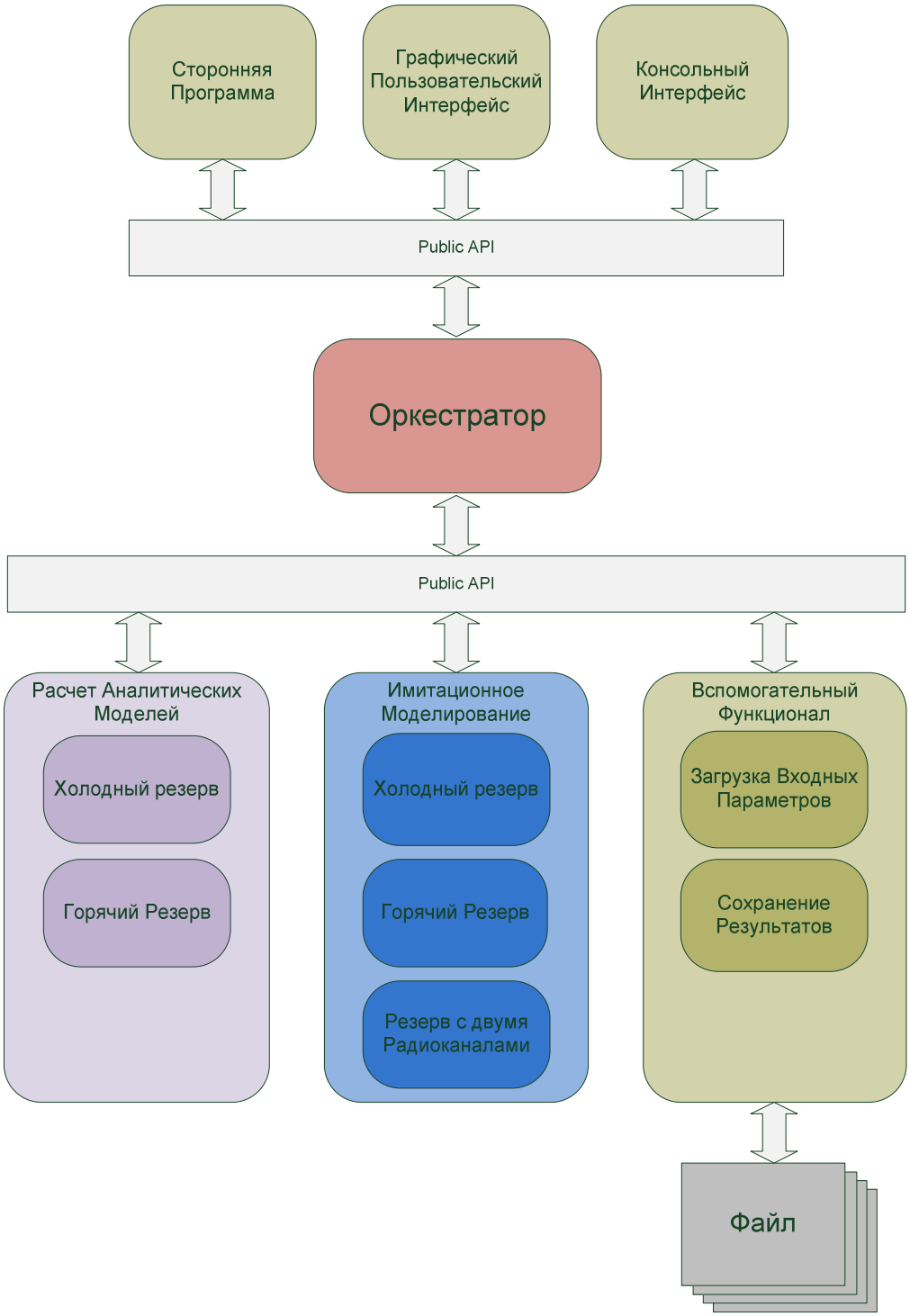

Рисунок 3.1. Архитектура пакета программ

Пакет программ состоит из следующих основных функциональных блоков:

- Графический пользовательский интерфейс
- Консольный интерфейс
- Оркестратор
- Функциональный блок для обсчета математических моделей
- Функциональный блок для имитационного моделирования

- Блок вспомогательного функционала

Каждый блок представляет собой «черный ящик» для остальных блоков. Взаимодействие блоков происходить только посредством Public API, зафиксированном в интерфейсе, предоставляемом каждым конкретным блоком. Такая организация функциональных блоков позволяет относительно легко модифицировать каждый из блоков, при этом не оказывая никакого влияния на остальные. Следовательно, добавление новых моделей, а также доработка уже существующих не представляет значительного труда.

Кроме деления на блоки, архитектура пакета программ предусматривает так же вертикальное деление на уровни. Самый верхний уровень – уровень представления. Этот уровень взаимодействует с пользователем и передает его команды основному функционалу. Кроме оболочек, которые взаимодействуют непосредственно с пользователем, на этом уровне может быть организован блок взаимодействия со сторонней программой, например Mathematica или MatLab.

Следующий уровень отвечает за взаимодействие блоков ниже лежащего уровня между собой. Кроме того в задачи этого уровня входит организация порядка выполнения функциональных блоков с нижележащего уровня.

Самый нижний уровень предоставляет собой набор простейших, с точки зрения верхнего уровня, действий, таких как

- Загрузить параметры из файлов
- Запустить модель
- Обработать результаты запуска модели
- Сохранить результаты в файл

Далее дается более подробное описание каждого из блоков.

Графический пользовательский интерфейс

Данный блок предоставляет дружелюбный интерфейс для пользователя. Посредством него пользователь может задать основные параметры модели, выбрать тип эксперимента, а также выбрать модель для использования в выбранном эксперименте.

Задав необходимые параметры для расчета модели, необходимо нажать кнопку «Рассчитать», после чего запустится обсчет выбранного эксперимента. В низу окна программы будет отображаться общий прогресс и примерное время оставшееся до окончания эксперимента.

По завершению обсчета модели, будет выведено сообщение о том, что эксперимент успешно завершен. Результаты эксперимента будут сохранены в csv файлы в папке, из которой была запущенна программа.

Консольный интерфейс

Консольный интерфейс предоставляет функциональность аналогичную с графическим интерфейсом, однако менее дружелюбен и требует больше действий от пользователя для запуска эксперимента.

В случае запуска программы в консольном варианте все входные параметры берутся из property файла (более подробно о входных параметрах дана информация в следующем разделе), а в консоли выводится сокращенная информация о текущем эксперименте и его ходе. В дополнение к этому в консоль выводится некоторая промежуточная информация, позволяющая отлеживать общий прогресс эксперимента, а так же наблюдать в реальном времени тенденции изменения основных характеристик системы.

Public API для взаимодействия со сторонними программами

Кроме интерфейса для взаимодействия с пользователем данный программный комплекс предоставляет библиотеки с Public API, которые могут быть использованы сторонними программами для вызова и использования имеющейся в программном комплексе функциональности.

Оркестратор

Оркестратор является ядром программного комплекса и основным модулем управления. Именно этот блок фактически оркестрирует работу всех остальных блоков, т.е. задает последовательность выполнения каждой операции отдельных модулей. Также через оркестратор взаимодействуют блоки ниже лежащего уровня.

Согласно параметрам модели и эксперимента заданных пользователем, блок оркестратора выбирает соответствующий подблок эксперимента и соответствующую модель для запуска. После выбора функциональных блоков для запуска, эти блоки инициализируются входными параметрами и запускаются на исполнение.

Всего программный комплекс на данный момент содержит 15 подблоков экспериментов. Первые 2 являются абстрактными и не используются напрямую. Все остальные эксперименты отнаследованы от одного из абстрактных блоков.

Одноразовый обсчет модели

Самый простой из представленных экспериментов. Выполняет однократный обсчет выбранной модели с заданными входными параметрами и сохраняет полученные

результаты в файл (Рисунок 3.2). Данный вид эксперимента в основном используется для отладки программного комплекса, а также для быстрого расчета позволяющего найти интересующий диапазон входных параметров.

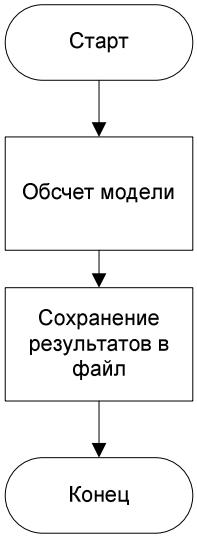

Рисунок 3.2. Блок-схема однократного расчета модели

Усреднение по нескольким итерациям

В данном виде эксперимента выполняется многократный обсчет одной и той же модель, причем с одними и теме же входными параметрами (Рисунок 3.3). Очевидно, что данный вид эксперимента имеет смысл запускать только для имитационных моделей, для усреднения полученных результатов. Количество итерация для усреднения можно задавать при помощи входных параметров. На выходе пакет программ сформирует два файла. Один будет содержать усредненные результаты (в данном эксперименте это будет одна строчка). Второй будет содержать детальную информацию по каждому запуску.

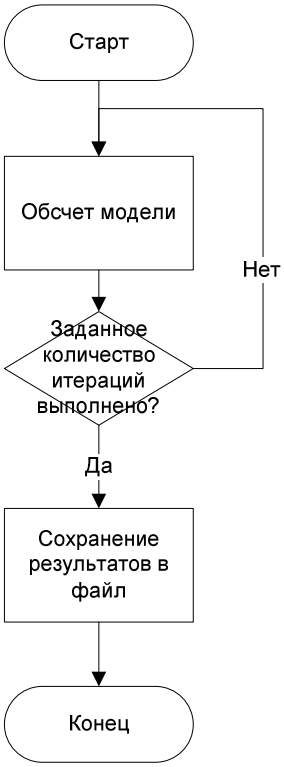

Рисунок 3.3. Блок-схема многократного расчета модели

Варьирование интенсивности входящих пакетов

В данном виде эксперимента можно проследить зависимость основных параметров гибридной системы от интенсивности входящего потока (Рисунок 3.4). Пакет программ будет варьировать интенсивность входящих пакетов в указанном диапазоне, запуская на каждой новой итерации обсчет модели с новым значением этого параметра. Причем если выбрана аналитическая модель, то на каждой итерации модель будет обсчитана с данным набором параметров только один раз. В случае же имитационной модели, обсчет будет производиться несколько раз (количество задается во входных параметрах) при одинаковых входных параметрах для усреднения результатов. Изменение интенсивности входящих пакетов происходит линейно с указанным шагом.

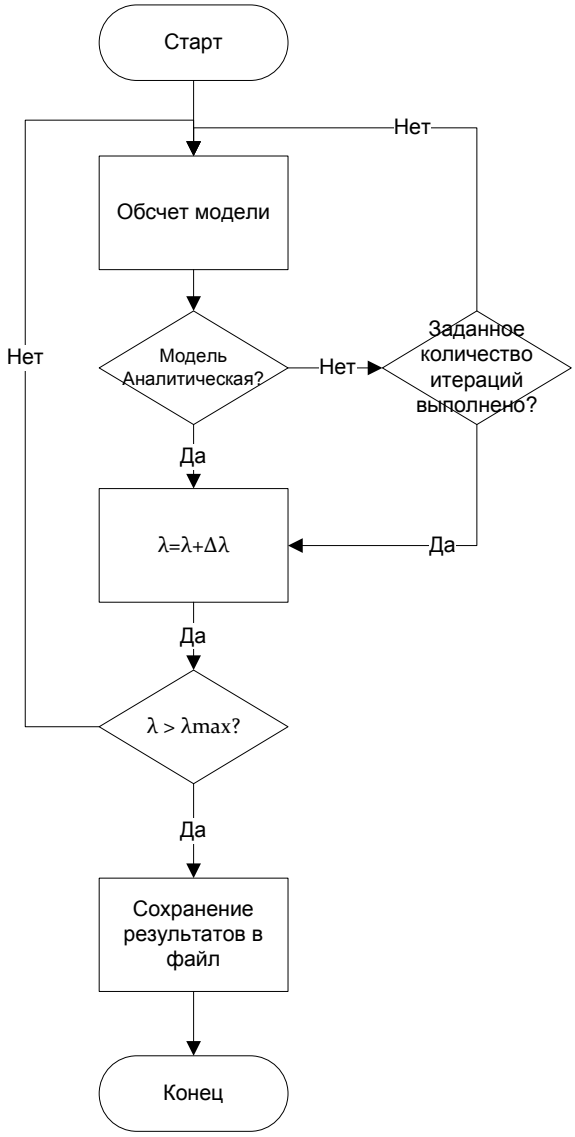

Рисунок 3.4. Блок-схема расчета зависимости гибридной системы от параметров входного потока

Варьирование времен переключения между каналами

Эксперимент по варьированию времен переключения между каналами поддерживает три подтипа:

- Варьирование времени переключения с оптического канала на радиоканал
- Варьирование времени переключения с радиоканала на оптический канал
- Варьирование обоих вышеуказанных параметров

Алгоритм работы первых двух подтипов аналогичен алгоритму работы эксперимента «Варьирование интенсивности входящих пакетов» описанного выше, только на каждой итерации меняется не интенсивность потока, а соответствующее время

переключения – либо время переключения с оптического канала на радиоканал, либо время переключения с радиоканала на оптический канал.

Третий подтип данного эксперимента является более сложным, и фактически представляет собой двухмерный эксперимент. В отличие от всех экспериментов, описанных выше, в данном подтипе варьируется не один параметр модели, а два. Причем изменение происходит не одновременно, а последовательно. Таким образом, на выходе для каждого рассчитываемого параметра системы получается матрица значений в зависимости от времен переключения. Пример такой матрицы для среднего времени ожидания пакета в очереди приведен ниже.

Блок-схема третьего подтипа изображена на Рисунке 3.5.

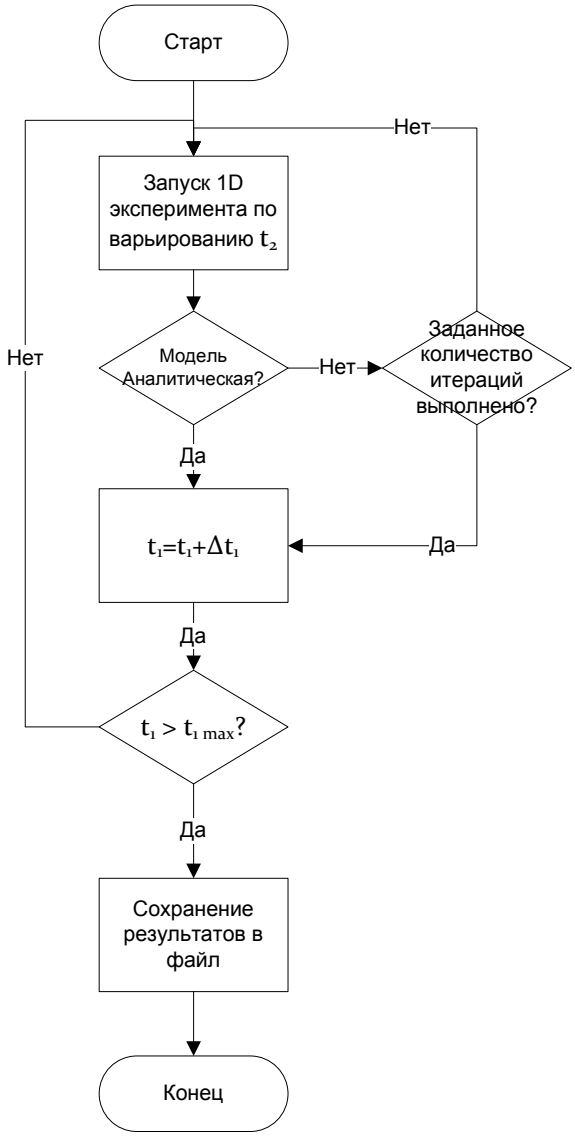

Рисунок 3.5. Блок-схема двумерного эксперимента.

При этом легко видеть, что алгоритм очень схож с представленными выше, однако на каждой итерации вместо обсчета модели запускается вложенный одномерный эксперимент по варьированию второго параметра. Можно также заметить, что такая организация экспериментов позволяет при необходимости создавать сколь угодно мерные эксперименты при минимальных трудозатратах.

Варьирование параметров погоды

Стоит отметить, что пакет программ предоставляет аналогичные возможности по варьированию параметров, как плохой погоды, так и хорошей. Алгоритмы экспериментов для изменения параметров плохой и параметров хорошей погоды идентичны и отличаются только тем, поведение какой погоды меняется. Поэтому здесь опишем подробно только случай плохой погоды, а для экспериментов по варьированию хорошей погоды вся функциональность будет точно такой же.

Итак, у данного эксперимента есть четыре подтипа, в зависимости от варьируемого параметра.

- Вероятность p в гиперэкспоненциальном
- Средняя продолжительность плохой погоды $\gamma^{(1)}$ с вероятностью p
- Средняя продолжительность плохой погоды $\gamma^{(2)}$ с вероятностью 1-p
- Одновременное варьирование параметров $\gamma^{(1)}$ и $\gamma^{(2)}$ для плохой погоды

Подробное описание и физический смысл каждого из параметров можно найти в соответствующем разделе посвященному блоку моделирования погоды. Каждый из первых трех подтипов представляет собой одномерный эксперимент, примеры которых уже были рассмотрены выше.

Последний подтип в значительной мере отличается от одномерных экспериментов представленных выше. Во-первых, на каждой итерации меняется не один параметр модели, а сразу два. Во-вторых, изменение происходит не по линейному закону, а путем умножения на соответствующий коэффициент, который свою очередь меняется каждую итерацию по линейному закону. Подробная блок-схема данного алгоритма представлена на Рисунке 3.6.

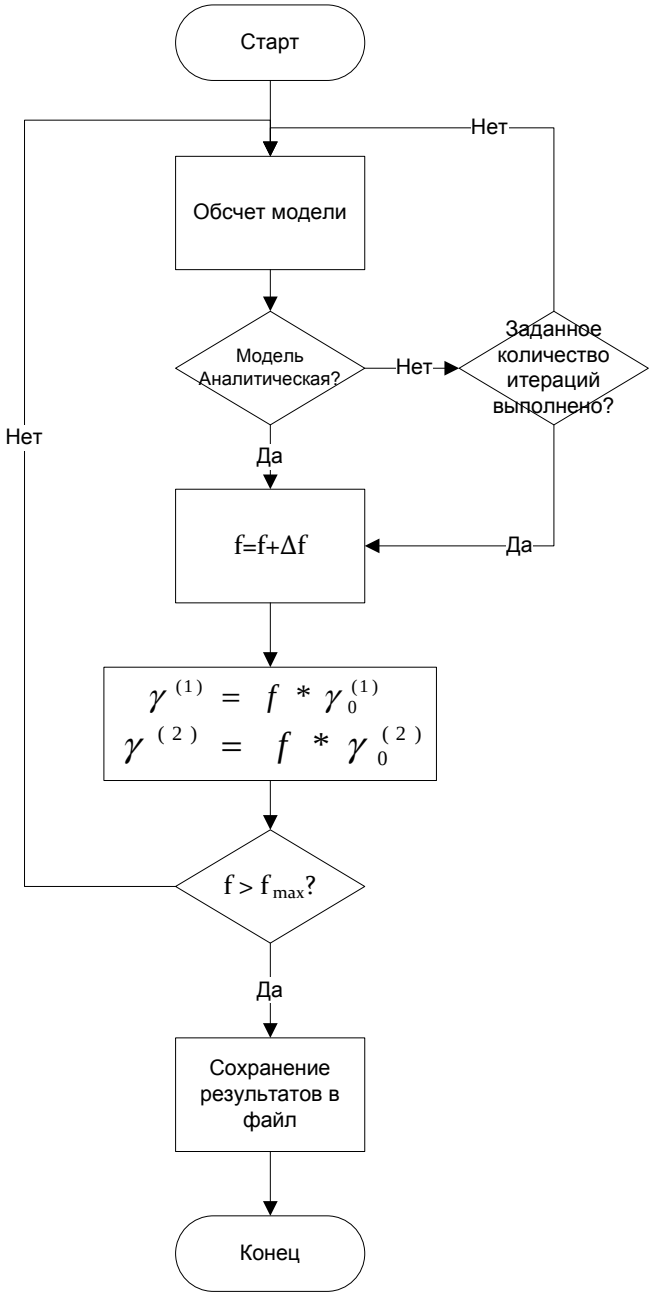

Рисунок 3.6. Блок-схема варьирования параметров погоды.

3.1.3 Функциональный блок для численного анализа моделей гибридного канала

Блок имитационного моделирования можно условно разделить на несколько составных частей. Рабочее окружение, вспомогательные модели и собственно модели гибридного устройства.

Планировщик

Окружение предоставляет набор вспомогательных функций, которые необходимы для имитационного моделирования:

- Запланировать какое-то действие на определенное время
- Выполнить определенное действие

Кроме того, именно функционал окружения ведет глобальное время в системе. Ядром окружения, которое и предоставляет все вышеуказанные функции в данном пакете программ, является планировщик. Каждый блок может «попросить» планировщик запланировать определенное действие на определенный момент времени в будущем. Когда указанный момент времени наступает, планировщик вызывает соответствующий API блока, запланировавшего это событие. По такой схеме работают абсолютно все блоки, задействованные в имитационном моделировании. Например, блок отвечающий за моделирование погоды таким образом планирует событие по изменению погоды. А блок моделирующий входящий поток так планирует момент времени, когда поступит следующая заявка.

Вспомогательные модели: модель погоды и модель трафика

К вспомогательным моделям можно отнести модель изменения погоды, а так же модель трафика данных, который поступает на вход гибридной системе.

В качестве модели трафика данных для гибридной системы используется простейший пуассоновский поток с λ = 1/T, где T – это средний интервал между последовательными заявками. Этот интервал можно задать во входных параметрах.

Изменение погоды моделируется с помощью двух абсолютно непрерывных случайных величин ξ_1 и ξ_2. Первая случайная величина описывает продолжительность хорошей погоды, вторая – продолжительность плохой. Собрав и обработав статистические данные по погоде из нескольких регионов, было выяснено, что случайная величина ξ_k может быть аппроксимирована случайной величиной с плотность гиперэкспоненциального распределения второго порядка

$$F_k(t) = p_k \gamma_k^{(1)} e^{-\gamma_k^{(1)} t} + (1 - p_k) \gamma_k^{(2)} e^{-\gamma_k^{(2)} t},$$

В данной версии пакета программ для моделирования гиперэкспоненциального распределения используется бесплатная библиотека colt.jar, которая предоставляет все необходимые возможности.

Модели гибридного устройства

В данной версии пакета программ представлено три модели для гибридного устройства. Во всех моделях основным каналом передачи данных является оптический атмосферный канал.

Модель с холодным резервом

В данной модели используется следующая дисциплина работы гибридного устройства. В условиях хорошей погоды и высоким соотношением сигнал-шум работает только один основной канал связи – оптический. При плохой погоде, когда оптический канал становится недоступным, текущее обслуживание заявки (передача пакета) прерывается и система переходит в режим мониторинга погоды. В этом режиме обслуживания пакетов не производится. Система должна выждать время Q_2, и если за это время погода вновь не стала хорошей (т.е. оптический канал стал вновь доступен), то по истечении времени Q_2 система перейдет в режим передачи данных по радиоканалу и начинается обслуживание пакетов данных скопившихся в очереди. При этом предполагаем, что заявка, обслуживание которой по оптическому каналу было прервано, обслуживается заново.

Когда оптический канал становится вновь доступным система, продолжая обслуживать заявки по радиоканалу, наблюдает доступность оптического канала по времени. И если ОАК доступен в течение определенного времени Q_1, то по истечении этого времени система переходит на первоначальный режим работы, т.е. передачу данных по оптическому каналу. При этом заявка, в ходе обслуживания которой произошла смена режима, обслуживается заново на новой скорости.

Модель с горячим резервом

Основное отличие данной модели от модели с холодным резервом в том, что радиоканал работает всегда, даже если погодные условия позволяют передавать данные по оптическому каналу. Дисциплина работы устройства в режиме с горячим резервом следующая. Пока погода хорошая, то работают оба канала связи. Заявки, поступающие на вход системе, становятся в общую очередь, при этом каждый канал по мере освобождения забирает заявки из этой очереди. Если погодные условия ухудшаются, и оптический канал становится недоступным, то текущая передача пакета данных прерывается, и пакет возвращается в очередь.

Когда оптический канал становится вновь доступным система, продолжая обслуживать заявок по радиоканалу, наблюдает доступность оптического канала по времени. И если ОАК доступен в течение определенного времени Q_1, то по истечении этого оптический канал опять начинает обслуживать заявки из очереди.

Модель с двумя резервными каналами

В рамках этой модели предполагается, что оптический канал параллельно функционирует с радиоканалом миллиметрового диапазона радиоволн (горячий резерв).

Радиоканал IEEE 802.11n, находящийся в холодном резерве, начинает работать только после прекращения функционирования обоих каналов горячего резерва. Более подробное описание этой модели приведено в заявке на изобретение «Многоканальная система передачи информации повышенной надежности на базе лазерной и радио технологий» (Приложение 2).

Блок вспомогательного функционала

Данный блок программы отвечает за работу с файловой системой, а также за обработку статистических данных собранных при моделировании.

Основные функции этого блока:

- Загрузка входных параметров из указанного property-файла
- Обработка и агрегация статистических данных, полученных в результате моделирования
- Сохранение обработанных данных в csv-файл

3.1.4 Входные параметры для расчета аналитической и машинной модели гибридного канала связи

Входным параметры для расчета могут быть заданы двумя способами:

- С помощью текстового property-файла
- Непосредственно в графическом интерфейсе

Ниже (Таблица 3.1) приведен полный список входных параметров, которые можно варьировать в зависимости от требуемых расчетов.

Таблица 3.1. Входные параметры для расчета аналитической и машинной модели гибридного канала связи.

Параметр	**Возможные значения/Единицы измерения**	**Описание**
ExperimentType	ONE_VALUE, AVG_VALUE, VAR_FLOWS, VAR_RO_SWITCH_TIME, VAR_OR_SWITCH_TIME, VAR_RO_OR_SWITCH_TIME, VAR_BAD_WEATHER_P, VAR_BAD_WEATHER_AV_1, VAR_BAD_WEATHER_AV_2, VAR_BAD_WEATHER_AV_FACTOR, VAR_GOOD_WEATHER_P, VAR_GOOD_WEATHER_AV_1, VAR_GOOD_WEATHER_AV_2, VAR_GOOD_WEATHER_AV_FAC	Задает тип эксперимента

	TOR	
USE_ANALYTICS	Boolean, true/false	Определяет будет ли использована оптимизация во время имитационного моделирования. Используется только для имитационных моделей
OUTPUT_FILE	Строка, по умолчанию out.csv	Задает имя файл с результатами расчетов
THROUGHPUT_OPTICS	Рациональное, положительное число, Mbps	Задает пропускную способность для оптического канала связи
THROUGHPUT_RADIO	Рациональное, положительное число, Mbps	Задает пропускную способность для радио канала связи
EXPERIMENT_LEN	Рациональное, положительное число, Годы	Длительность эксперимента в годах.
EXPERIMENTS_NUMBER	Натуральное число, по умолчанию 10	Число экспериментов необходимых для усреднения результата.
TURN_OFF_WEATHER	Boolean, true/false	Позволяет отключить изменение погоды в эксперименте. В основном используется для отладки.
TURN_OFF_OPTICS	Boolean, true/false	Позволяет отключить оптический канал. В основном используется для отладки.
TURN_OFF_RADIO	Boolean, true/false	Позволяет отключить радио канал. В основном используется для отладки.
BAD_WEATHER_P	Рациональное число из промежутка (0, 1)	Вероятность p в гиперэкспоненциальном распределинии задающим длительность плохой погоды
BAD_WEATHER_AV_1	Рациональное, положительное число Минуты	Средняя продолжительность плохой погоды с вероятностью p.
BAD_WEATHER_AV_2	Рациональное, положительное число Минуты	Средняя продолжительность плохой погоды с

		вероятностью 1-p.
GOOD_WEATHER_P	Рациональное число из промежутка (0, 1)	Вероятность p в гиперэкспоненциальном распределении задающим длительность хорошей погоды
GOOD_WEATHER_AV_1	Рациональное, положительное число Часы	Средняя продолжительность хорошей погоды с вероятностью p.
GOOD_WEATHER_AV_2	Рациональное, положительное число Часы	Средняя продолжительность хорошей погоды с вероятностью 1-p.
SWITCH_OR_TIME	Рациональное, положительное число Секунды	Время переключения с оптического канала на радиоканал
SWITCH_RO_TIME	Рациональное, положительное число Секунды	Время переключения с радиоканала на оптического канал
PACKET_INTERVAL	Рациональное, положительное Миллисекунды	Среднее время между входящими пакетами с данными
PACKET_LEN	Целое, Байты	Средний размер пакетов для передачи данных
SWITCH_OR_TIME_FROM	Рациональное, положительное число Секунды	Начальное значение времени переключения с оптического канала на радиоканал при его варьировании. Применимо только для эксперимента с варьированием времени переключения с оптического канала на радио канал.
SWITCH_OR_TIME_TO	Рациональное, положительное число Секунды	Конечное значение времени переключения с оптического канала на радиоканал при его варьировании. Применимо только для эксперимента с варьированием времени переключения с оптического канала на радио канал.
SWITCH_OR_TIME_STEP	Рациональное, положительное число Секунды	Шаг при изменении времени переключения с

		оптического канала на радиоканал при его варьировании. Применимо только для эксперимента с варьированием времени переключения с оптического канала на радио канал.
SWITCH_RO_TIME_FROM	Рациональное, положительное число Секунды	Начальное значение времени переключения с радиоканала на оптический канал при его варьировании. Применимо только для эксперимента с варьированием времени переключения с радиоканала на оптический канал.
SWITCH_RO_TIME_TO	Рациональное, положительное число Секунды	Конечное значение времени переключения с радиоканала на оптический канал при его варьировании. Применимо только для эксперимента с варьированием времени переключения с радиоканала на оптический канал.
SWITCH_RO_TIME_STEP	Рациональное, положительное число Секунды	Шаг при изменении времени переключения с радиоканала на оптический канал при его варьировании. Применимо только для эксперимента с варьированием времени переключения с радиоканала на оптический канал.
PACKET_INTERVAL_FROM	Рациональное, положительное число Миллисекунды	Начальное значение среднего промежуток времени между двумя

		последовательными пакетами с данными. Применимо только для эксперимента с варьированием этого интервала.
PACKET_INTERVAL_TO	Рациональное, положительное число Миллисекунды	Конечное значение среднего промежуток времени между двумя последовательными пакетами с данными. Применимо только для эксперимента с варьированием этого интервала.
PACKET_INTERVAL_STEP	Рациональное, положительное число Миллисекунды	Шаг при изменении значения среднего промежуток времени между двумя последовательными пакетами с данными. Применимо только для эксперимента с варьированием этого интервала.
BAD_WEATHER_P_FROM	Рациональное число из промежутка (0, 1)	Начальное значение вероятности *p* в гиперэкспоненциальном распределении задающем длительность плохой погоды. Применимо только для эксперимента с варьированием этого параметра.
BAD_WEATHER_P_TO	Рациональное число из промежутка (0, 1)	Конечное значение вероятности *p* в гиперэкспоненциальном распределении задающем длительность плохой погоды. Применимо только для эксперимента с варьированием этого параметра.
BAD_WEATHER_P_STEP	Рациональное число из промежутка (0, 1)	Шаг при изменении значения вероятности *p* в гиперэкспоненциальном распределении задающем длительность плохой погоды.

		Применимо только для эксперимента с варьированием этого параметра.
GOOD_WEATHER_P_FROM	Рациональное число из промежутка (0, 1)	Начальное значение вероятности *p* в гиперэкспоненциальном распределении задающем длительность хорошей погоды. Применимо только для эксперимента с варьированием этого параметра.
GOOD_WEATHER_P_TO	Рациональное число из промежутка (0, 1)	Конечное значение вероятности *p* в гиперэкспоненциальном распределении задающем длительность хорошей погоды. Применимо только для эксперимента с варьированием этого параметра.
GOOD_WEATHER_P_STEP	Рациональное число из промежутка (0, 1)	Шаг при изменении значения вероятности p в гиперэкспоненциальном распределении задающем длительность хорошей погоды. Применимо только для эксперимента с варьированием этого параметра.
BAD_WEATHER_AV_1_FROM	Рациональное, положительное число Минуты	Начальное значение параметра $\gamma^{(1)}$ в гиперэкспоненциальном распределении задающем длительность плохой погоды. Применимо только для эксперимента с варьированием этого параметра.
BAD_WEATHER_AV_1_TO	Рациональное, положительное число Минуты	Конечное значение параметра $\gamma^{(1)}$ в гиперэкспоненциальном распределении задающем длительность плохой погоды.

		Применимо только для эксперимента с варьированием этого параметра.
BAD_WEATHER_AV_1_STEP	Рациональное, положительное число Минуты	Шаг при изменении параметра $\gamma^{(1)}$ в гиперэкспоненциальном распределении задающем длительность плохой погоды. Применимо только для эксперимента с варьированием этого параметра.
BAD_WEATHER_AV_2_FROM	Рациональное, положительное число Минуты	Начальное значение параметра $\gamma^{(2)}$ в гиперэкспоненциальном распределении задающем длительность плохой погоды. Применимо только для эксперимента с варьированием этого параметра.
BAD_WEATHER_AV_2_TO	Рациональное, положительное число Минуты	Конечное значение параметра $\gamma^{(2)}$ в гиперэкспоненциальном распределении задающем длительность плохой погоды. Применимо только для эксперимента с варьированием этого параметра.
BAD_WEATHER_AV_2_STEP	Рациональное, положительное число Минуты	Шаг при изменении параметра $\gamma^{(2)}$ в гиперэкспоненциальном распределении задающем длительность плохой погоды. Применимо только для эксперимента с варьированием этого параметра.
GOOD_WEATHER_AV_1_FROM	Рациональное, положительное число Часы	Начальное значение параметра $\gamma^{(1)}$ в гиперэкспоненциальном распределении задающем длительность хорошей погоды. Применимо только

		для эксперимента с варьированием этого параметра.
GOOD_WEATHER_AV_1_TO	Рациональное, положительное число Часы	Конечное значение параметра $\gamma^{(1)}$ в гиперэкспоненциальном распределении задающем длительность хорошей погоды. Применимо только для эксперимента с варьированием этого параметра.
GOOD_WEATHER_AV_1_STEP	Рациональное, положительное число Часы	Шаг при изменении параметра $\gamma^{(1)}$ в гиперэкспоненциальном распределении задающем длительность хорошей погоды. Применимо только для эксперимента с варьированием этого параметра.
GOOD_WEATHER_AV_2_FROM	Рациональное, положительное число Часы	Начальное значение параметра $\gamma^{(2)}$ в гиперэкспоненциальном распределении задающем длительность хорошей погоды. Применимо только для эксперимента с варьированием этого параметра.
GOOD_WEATHER_AV_2_TO	Рациональное, положительное число Минуты	Конечное значение параметра $\gamma^{(2)}$ в гиперэкспоненциальном распределении задающем длительность хорошей погоды. Применимо только для эксперимента с варьированием этого параметра.
GOOD_WEATHER_AV_2_STEP	Рациональное, положительное число Минуты	Шаг при изменении параметра $\gamma^{(2)}$ в гиперэкспоненциальном распределении задающем длительность хорошей погоды. Применимо только для эксперимента с

		варьированием этого параметра.
BAD_WEATHER_AV_FACTOR_FROM	Рациональное, положительное число	Начальное значение параметра *f* при варьировании параметров γ в гиперэкспоненциальном распределении задающем длительность плохой погоды. Применимо только для эксперимента с варьированием этого параметра.
BAD_WEATHER_AV_FACTOR_TO	Рациональное, положительное число	Конечное значение параметра *f* при варьировании параметров γ в гиперэкспоненциальном распределении задающем длительность плохой погоды. Применимо только для эксперимента с варьированием этого параметра.
BAD_WEATHER_AV_FACTOR_STEP	Рациональное, положительное число	Шаг при изменении параметра *f* при варьировании параметров γ в гиперэкспоненциальном распределении задающем длительность плохой погоды. Применимо только для эксперимента с варьированием этого параметра.
BAD_WEATHER_AV_1_INITIAL	Рациональное, положительное число Минуты	Значение $\gamma^{(1)}_0$ в эксперименте по одновременному варьированию параметров γ в гиперэкспоненциальном распределении задающем длительность плохой погоды. Применимо только для соответствующего эксперимента.
BAD_WEATHER_AV_2_INITIAL	Рациональное, положительное	Значение $\gamma^{(2)}_0$ в

	число Минуты	эксперименте по одновременному варьированию параметров γ в гиперэкспоненциальном распределении задающем длительность плохой погоды. Применимо только для соответствующего эксперимента.
GOOD_WEATHER_AV_FACTOR_FROM	Рациональное, положительное число	Начальное значение параметра *f* при варьировании параметров γ в гиперэкспоненциальном распределении задающем длительность хорошей погоды. Применимо только для эксперимента с варьированием этого параметра.
GOOD_WEATHER_AV_FACTOR_TO	Рациональное, положительное число	Конечное значение параметра *f* при варьировании параметров γ в гиперэкспоненциальном распределении задающем длительность хорошей погоды. Применимо только для эксперимента с варьированием этого параметра.
GOOD_WEATHER_AV_FACTOR_STEP	Рациональное, положительное число	Шаг при изменении параметра *f* при варьировании параметров γ в гиперэкспоненциальном распределении задающем длительность хорошей погоды. Применимо только для эксперимента с варьированием этого параметра.
GOOD_WEATHER_AV_1_INITIAL	Рациональное, положительное число Часы	Значение $\gamma^{(1)}_0$ в эксперименте по одновременному варьированию

		параметров γ в гиперэкспоненциальном распределении задающем длительность хорошей погоды. Применимо только для соответствующего эксперимента.
GOOD_WEATHER_AV_2_INITIAL	Рациональное, положительное число Часы	Значение $\gamma^{(2)}_0$ в эксперименте по одновременному варьированию параметров γ в гиперэкспоненциальном распределении задающем длительность хорошей погоды. Применимо только для соответствующего эксперимента.

3.2 Отладка алгоритмов работы устройств в составе системы, оптимизация этих алгоритмов

3.2.1 Отладка и оптимизация алгоритмов работы

В процессе предварительного анализа о возможности реализовать имитационные модели, описанные выше, было показано, что полный обсчет любой из предложенных моделей будет занимать значительное время. Поэтому была проведена следующая отладка алгоритмов работы и их оптимизация.

Для каждого режима работы рассчитывался период регенерации системы, т.е. средний промежуток времени между двумя соседними моментами времени, когда в системе нет ни одной заявки. Для рассмотренных выше режимов работы системы это сделать достаточно легко.

Когда в системе не остается ни одной заявки, то имитационное моделирование приостанавливается. Рассчитывается время изменения режима работы системы. Затем вычисляется количество целых периодов регенерации помещающихся между текущим моментом времени и сменой режима работы. После этого время в модели увеличивается на целое число периодов регенерации, а статистика обновляется соответствующим образом, чтобы учесть такой переход во времени.

Таким образом, фактически имитационная модель работает в моменты времени, граничащие с моментами смены режима работы в гибридной системе. Такая оптимизация дала значительное уменьшение времени обсчета имитационных моделей. При необходимости данная оптимизация может быть отключена.

Для сравнения результатов с использованием оптимизации и без нее было проведено численное моделирование, которое показало, что полученные результаты идентичны и, следовательно, применение описанной выше оптимизации допустимо.

Помимо режима с оптимизацией, программный пакет поддерживает еще несколько режимов работы, которые в основном используются для отладки:

- Есть возможность отключить влияние изменений погодных условий. В этом случае гибридная система будет работать в одном режиме на протяжении всего эксперимента.
- Есть возможность полностью отключить один из каналов связи.
- Есть возможность явно задать моменты времени, когда будет изменятся погода
- Есть возможность явно задать моменты времени, когда будут поступать заявки в систему

Указанные выше режимы не использовались для получения конечных результатов, однако сильно упростили процесс отладки представленного пакета программ.

3.2.2 Руководство пользователя и системного программиста

Руководство системного программиста

Представленный программный комплекс, предназначен для численного обсчета разработанных моделей гибридной системы основанной на атмосферном оптическом канале связи и радиоканале. Программный комплекс объединяет несколько математических моделей, а так же ряд имитационных моделей.

Программный комплекс является платформонезависимомым, т.к. реализован с помощью языка программирования Java. Для своего запуска комплекс требует наличие установленной на компьютере java-машины не ниже версии 1.6. Для графического пользовательского интерфейса используется библиотека Swing. Кроме того, комплекс имеет свою систему логирования, которая может понадобиться для отладки программы, однако для этого требуется установка дополнительных библиотек.

Представленный программный комплекс имеет блочную архитектуру, что позволяет очень легко и быстро добавлять новые модели и эксперименты, а также расширять и

дорабатывать существующие. Высокоуровневая архитектура представленного пакета программ описана в предыдущем разделе.

Каждый эксперимент по исследованию характеристик гибридной системы представляет собой отдельный Java класс, в котором и реализована вся логика эксперимента. Все эксперименты должны наследоваться от класса AbstractExperiment. Этот класс задает интерфейс взаимодействия с остальными блоками, а также задает порядок действий стандартного эксперимента.

В случае если в эксперименте не предусмотрено никаких итераций то, класс, представляющий этот эксперимент, должен наследоваться непосредственно от AbstractExperiment. В этом случае класс эксперимента должен переопределить всего один метод execute, в котором и определяется вся логика.

Однако в большинстве экспериментов необходимо варьировать один или несколько параметров, или же просто провести несколько расчетов модели при неизменных параметрах, например для усреднения данных в имитационных моделях. В этом случае следует наследоваться от класса AbstractIterativeExperiment, где основная логика по итерированию уже реализована. В этом случае следует переопределить следующие методы (Таблица 3.2):

Таблица 3.2. Описание применяемых методов.

Название метода	Описание
init();	Этот метод вызывается в самом начале эксперимента. В нем должны инициализироваться все внутренние параметры, а также загружаться внешние, если в этом есть необходимость.
hasNext();	Метод вызывается перед каждой итерацией и определяет, будет ли продолжен эксперимент.
nextIteration();	Вызов этого метода означает переход к следующей итерации. Обычно в этом методе обновляется значение параметра, по которому происходит итерирование.
runIteration();	Этот метод должен запускать выполнение очередной итерации. Обычно в нем инициализируется модель и запускается на выполнение
getVarName();	Возвращает имя переменной, по которой происходит итерирование
getCurrentVarValue();	Возвращает текущее значение переменной, по которой происходит итерирование
getExperimentName();	Возвращает имя эксперимента

После того, как добавлен новый класс эксперимента, его надо зарегистрировать в конфигурации, после чего он становится доступным на выполнение.

Руководство пользователя для пакета программ аналитического и машинного (имитационного) моделирования гибридного канала связи

Запуск программы

Представленный программный комплекс является платформонезависимомым, т.к. реализован с помощью с помощью языка программирования Java. Для своего запуска комплекс требует наличие установленной на компьютере java-машины не ниже версии 1.6.

В состав программы входят следующие файлы (Таблица 3.3):

Таблица 3.3.Файлы программного комплекса.

Файл	Описание
colt.jar	Предоставляет высокопроизводительную функциональность для научных расчётов. В данном программном комплексе используются только алгоритмы по генерации входящего потока заявок.
commons-logging.jar	Предоставляет функциональность по логированию
experiment.properties	Задает входные параметры программы
simulation.jar	Содержит всю функциональность представленного программного комплекса.

Все вышеуказанные файлы должны находиться в одной директории.

Для запуска программы пользователь должен воспользоваться следующей командой

java -cp simulation.jar;colt.jar;commons-logging.jar model.hybrid.v3.Main

При этом для успешного запуска, путь к установленной java-машине должен быть прописан в переменной среды PATH. Так же это позволяет запускать программу из любого места на диске. При старте программа считывает входящие параметры, выбирает модуль для заданного типа эксперимента и запускает его на выполнение. По окончанию работы программа формирует 2 файла с результатами моделирования: по умолчанию это *out.csv* и *out_detailed.csv*, однако их имена могут быть измены, задав соответствующие входящие параметры.

Входные параметры для расчета моделей задаются с помощью текстового property-файла. Пользователь должен задать как тип эксперимента и модели, так и численные параметры модели, например, параметры входящего потока заявок, параметры устройства, параметры погоды и т.д.

Полный список входных параметров, которые можно варьировать в зависимости от требуемых расчетов, приведен в разделе 3.1.4.

После того как расчет модели завершился, программный комплекс формирует два файла с результатами:

- *out.csv*
- *out_detailed.csv*

Имена, указанные выше, используются по умолчанию, и могут быть изменены с помощью входящих параметров. Важно отметить, что содержание этих файлов отличается только для имитационных моделей, в этом случае второй файл содержит информацию по каждому запуску модели, а первый только усредненные результаты.

Оба файла имеют формат csv, в качестве разделителя используется ‘;’, поэтому файл может быть открыт с помощью любой популярной офисной программы, например Excel. В зависимости от типа эксперимента первые несколько колонок могут меняться – они показывают варьируемую величину в выбранном эксперименте. Остальные же колонки остаются неизменными и показывают основные характеристики системы, которые были получены в результате эксперимента. Ниже приведен их полный список с подробным описанием (Таблица 3.4).

Таблица 3.4. Описание параметров.

Параметр	**Единицы измерения**	**Описание**
Average queue length		Средняя длина очереди входящих заявок в гибридной системе
Average waiting time	Сек.	Среднее время ожидания заявки в очереди
Average Throughput	Mbps	Средняя пропускная способность гибридной системы в целом
Max queue length		Максимальная длина очереди на протяжении всего эксперимента
Average queue length at serve end		Средняя длина очереди входящих заявок в гибридной системе на момент завершения обслуживания заявок
Packets sent through optics		Общее количество пакетов переданных по оптическому каналу за время эксперимента
Packets sent through radio		Общее количество пакетов переданных по радиоканалу за время эксперимента
Packets sent while analytics		Общее количество пакетов переданных гибридной системой, при использовании расчетов по аналитическим формулам
Packets sent total		Общее количество пакетов переданных гибридной системой за все время эксперимента
Optics switch-on times		Количество включений оптического канала за время эксперимента
Radio switch-on times		Количество включений радиоканала за время эксперимента
Weather changes		Количество изменений погодных условий за время эксперимента
Switches to analytics		Количество раз, которое применялась оптимизация с применением аналитических формул. Применимо только для имитационных моделей
Optics time	Сек.	Время работы оптического канала
Radio time	Сек.	Время работы радиоканала
Unavailable time	Сек.	Время, в течение которого связь в гибридной системе не была доступна
Availability	%	Процент доступности связи в гибридной

		системе за время эксперимента
Unavailability	%	Процент недоступности связи в гибридной системе за время эксперимента
Optics Throughput	Mbps	Средняя пропускная способность оптического канала
Radio Throughput	Mbps	Средняя пропускная способность радиоканала
Number of tries to send packet		Общее количество попыток (в том числе неудачных) переслать пакет
Total time	Sec	Общее время эксперимента

3.2.3 Описание применения для пакета программ аналитического и машинного (имитационного) моделирования гибридного канала связи

Программный комплекс объединяет несколько математических моделей, а так же ряд имитационных моделей. Модели позволяют рассчитать основные характеристики гибридной системы, такие как:

- Среднюю пропускную способность системы
- Среднее время доступности каналов
- Среднее время задержки пакета с данными

Данный программный комплекс предназначен для анализа влияния различных характеристик системы на пропускную способность гибридного канала. В большинстве случаев провести натуральный эксперимент с реальным устройством нет возможности, по следующим причинам:

- Эксперимент требует значительного времени для получения адекватного результата
- Необходимо готовое устройство
- Требуется значительные финансовые ресурсы

Данный же программный комплекс позволяет в короткие сроки получить характеристики гибридной системы в кратчайшие сроки и без каких-либо затрат.

Чтобы запустить расчеты, пользователь должен выбрать тип эксперимента и модель, которая будет использоваться в очередном эксперименте. Кроме того, необходимо задать ряд других параметров гибридной системы и окружающей среды, которые участвуют в расчетах. Полный список входных параметров можно увидеть в соответствующей главе.

Следующие модели представлены в данной версии пакета программ:

- Аналитические модели
  - Гибридная система с холодным резервом
  - Гибридная система с горячим резервом
- Имитационные модели

- Гибридная система с холодным резервом
- Гибридная система с горячим резервом
- Гибридный канал с двумя резервными радиоканалами

Под холодным резервом понимается режим, когда работает только один из каналов и переключение между каналами происходит при изменении погодных условий. В горячем же режиме радиоканал работает всегда, позволяя увеличить пропускную способность при хорошей погоде, когда оптический канал доступен.

Кроме того, программный комплекс поддерживает следующие типы экспериментов:

- Одноразовый обсчет модели
- Усреднение по нескольким итерациям (только для имитационного моделирования)
- Расчет модели при варьировании интенсивности входящих пакетов
- Расчет модели при варьировании времен переключения между каналами
  - Время переключения с оптического канала на радиоканал
  - Время переключения с радиоканала на оптический канал
  - Варьирование обоих параметров
- Расчет модели при варьировании параметров погоды
  - Параметры плохой погоды
    - Вероятность p в гиперэкспоненциальном
    - Средняя продолжительность плохой погоды $\gamma^{(1)}$ с вероятностью p
    - Средняя продолжительность плохой погоды $\gamma^{(2)}$ с вероятностью 1-p
    - Одновременное варьирование параметров $\gamma^{(1)}$ и $\gamma^{(2)}$ для плохой погоды
  - Параметры хорошей погоды
    - Вероятность p в гиперэкспоненциальном
    - Средняя продолжительность плохой погоды $\gamma^{(1)}$ с вероятностью p
    - Средняя продолжительность плохой погоды $\gamma^{(2)}$ с вероятностью 1-p
    - Одновременное варьирование параметров $\gamma^{(1)}$ и $\gamma^{(2)}$ для хорошей погоды

Важно отметить, что во всех типах экспериментов для имитационных моделей, кроме итераций по варьированию параметра выбранного в данном эксперименте, проводятся также итерации с неизменными параметрами, для усреднения полученных результатов. Количество итераций для усреднения результатов можно задавать во входных параметрах.

3.3 Анализ численных результатов выбора оптимальных параметров и сравнительного анализа вариантов построения гибридного канала.

В данном разделе приведены результаты имитационного моделирования канала связи. В имитационной модели в широких пределах варьируются времена переключения между режимами работы канала и интенсивности входного потока. В качестве выходных показателей модели используются следующие характеристики канала связи: недоступность (%), пропускная способность (Мбит/с), число переключений между режимами (переключений в день), средняя и максимальная длины очереди (пакетов) и среднее и максимальное времена пребывания пакета в системе.

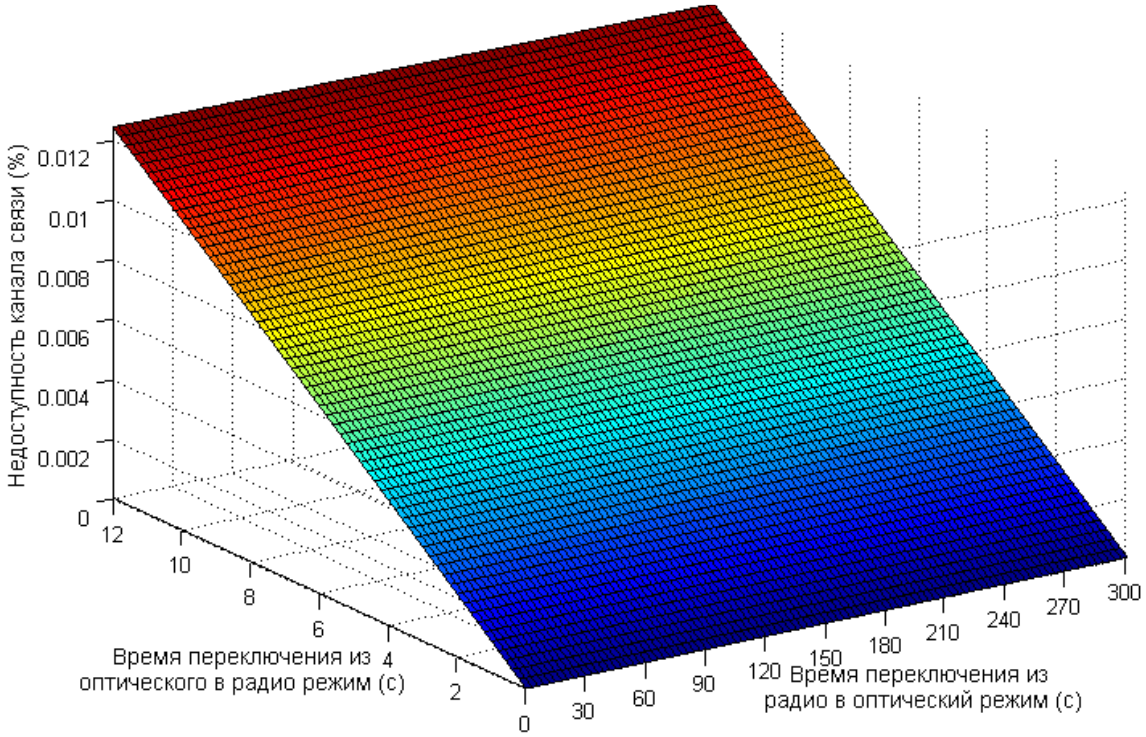

Рисунок 3.7. Зависимость недоступности канала связи от времен переключения между режимами

Главным критерием работоспособности канала считается его доступность. В требованиях проекта данная доступность выбрана на уровне 99.99 %, что означает, что недоступность канала не должна превышать 0.01 %. Как видно из Рисунка 3.7 недоступность канала связи практически не зависит от времени переключения из радио в

оптический режим (T_{RO}), однако сильно зависит от времени переключения из оптического в радио режим (T_{OR}).

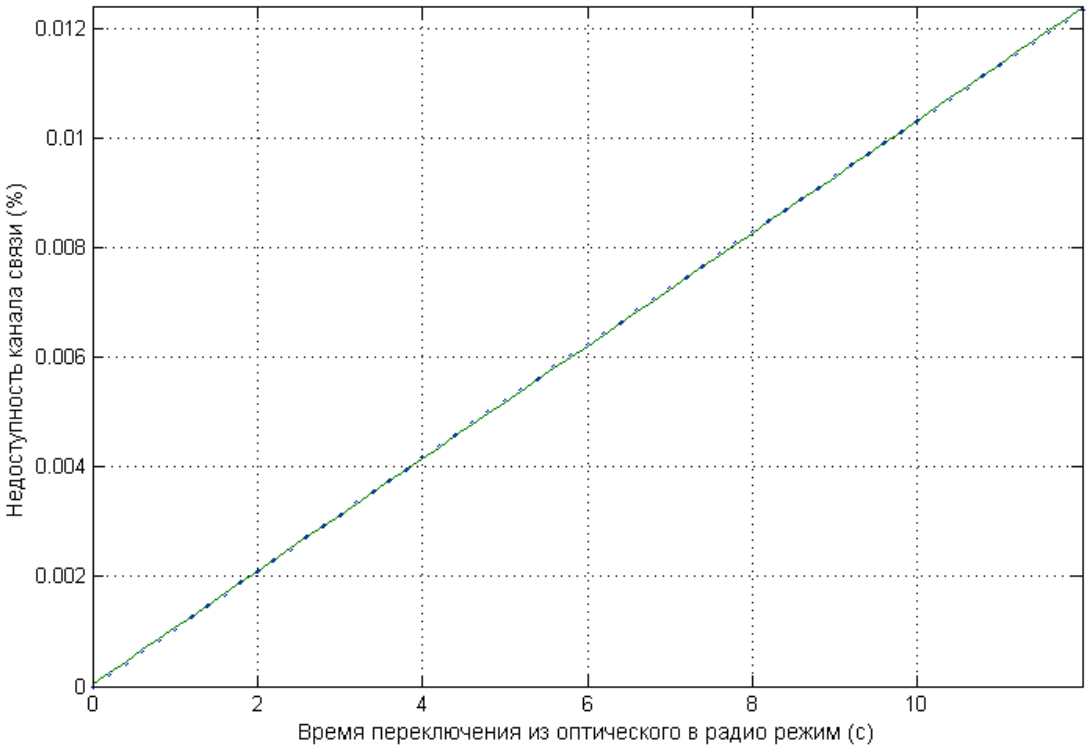

Рисунок 3.8. Зависимость недоступности канала связи от времен переключения из оптического в радио режим при мгновенном обратном переключении

Для более наглядного представления недоступности канала в зависимости от T_{OR} и ее малой зависимости от T_{RO} приведены графики при T_{RO} = 0 и 5 минут (см.Рисунок 3.8 и Рисунок 3.9, соответственно). Как видно из графиков, доступность канала 99.99 % обеспечивается при T_{OR}, не превышающем 9.5 с, а при времени переключения до 1 с может быть обеспечена доступность 99.999 %. Как было сказано выше, время T_{RO} практически не сказывается на недоступности канала, поэтому может принимать любые значения в широком диапазоне.

На следующих трех графиках приведена зависимость средней пропускной способности канала от времен переключения, см. Рисунок 3.10, Рисунок 3.11, Рисунок 3.12. Как видно из графиков, пропускная способность, в отличие от доступности канала, сильнее зависит от T_{RO}, чем от T_{OR}, однако, во всем выбранном диапазоне значений времен переключения пропускная способность изменяется менее чем на 0.3 %. Таким образом, можно сказать, что уменьшение времени T_{RO} лишь незначительно повышает среднюю пропускную способность канала.

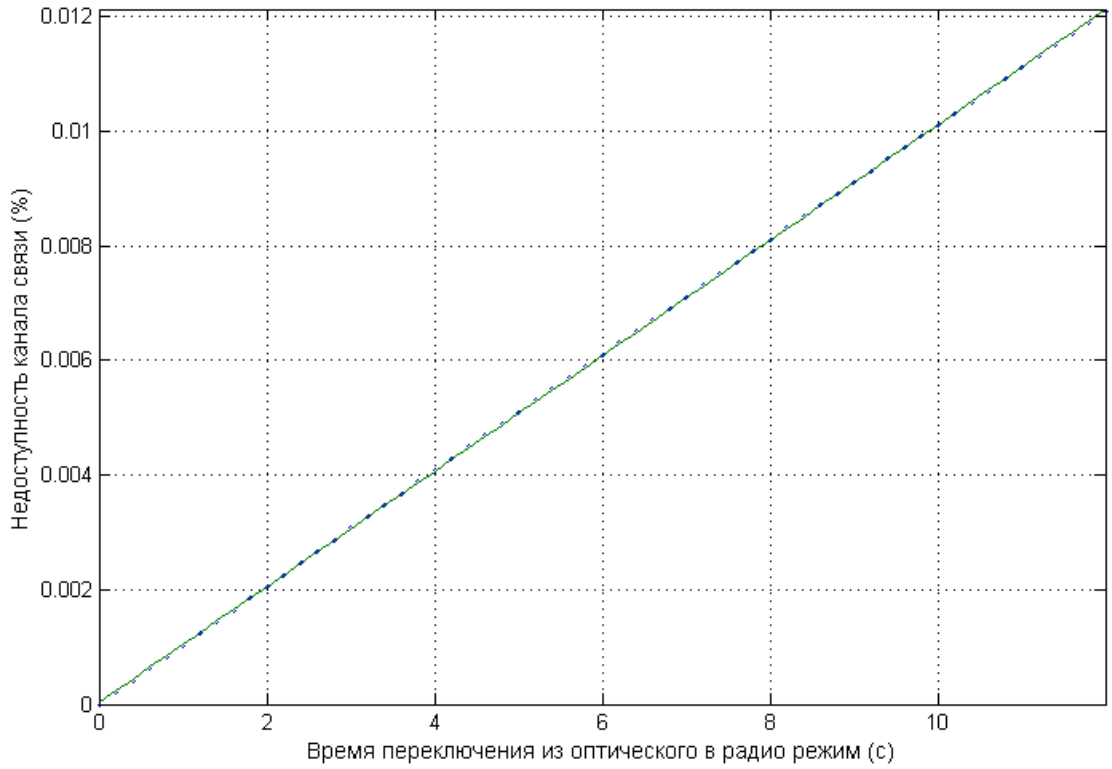

Рисунок 3.9. Зависимость недоступности канала связи от времен переключения из оптического в радио режим при пятиминутном обратном переключении

Из графиков зависимости пропускной способности канала от T_{OR}, см. Рисунок 3.11 и Рисунок 3.12, можно сделать вывод, что при различных значениях T_{RO} зависимость имеет абсолютно противоположный вид. Данное явление вполне закономерно, так как при длительном переключении из радио в оптический режим с точки зрения пропускной способности может быть выгоднее вообще не переключаться из оптического в радио режим. Если же обратное переключение происходит быстро, то при своевременном переключении из оптического в радио режим пропускная способность увеличивается.

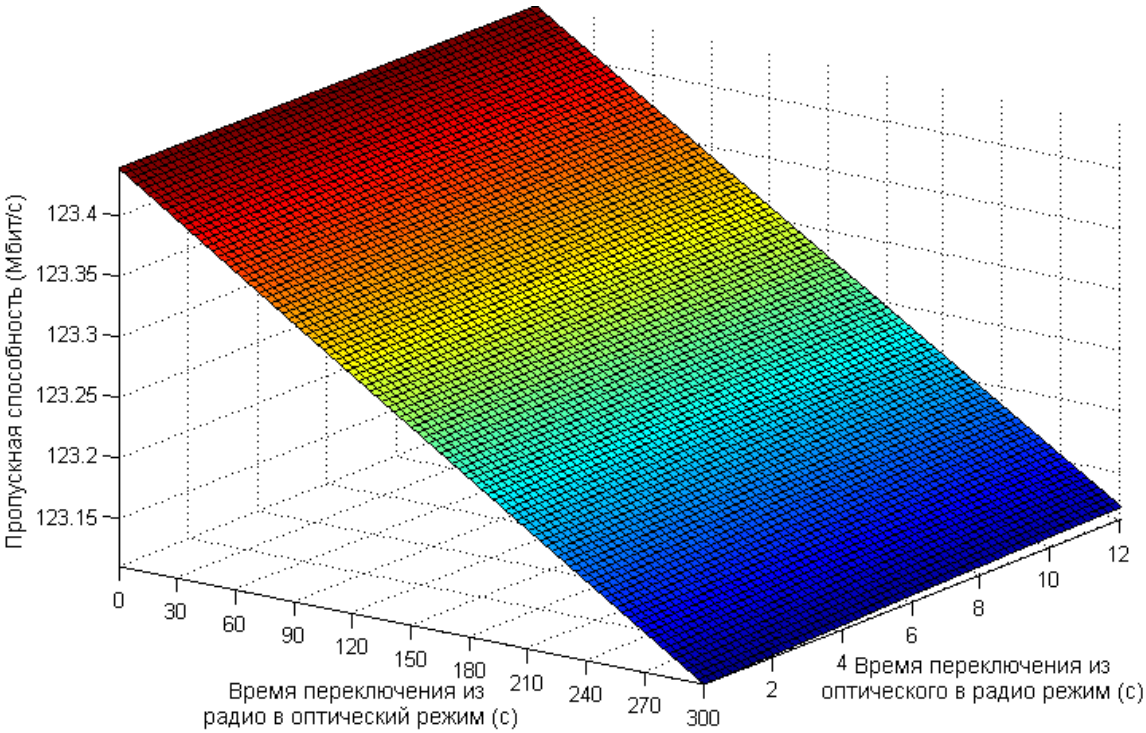

Рисунок 3.10. Зависимость пропускной способности канала связи от времен переключения между режимами

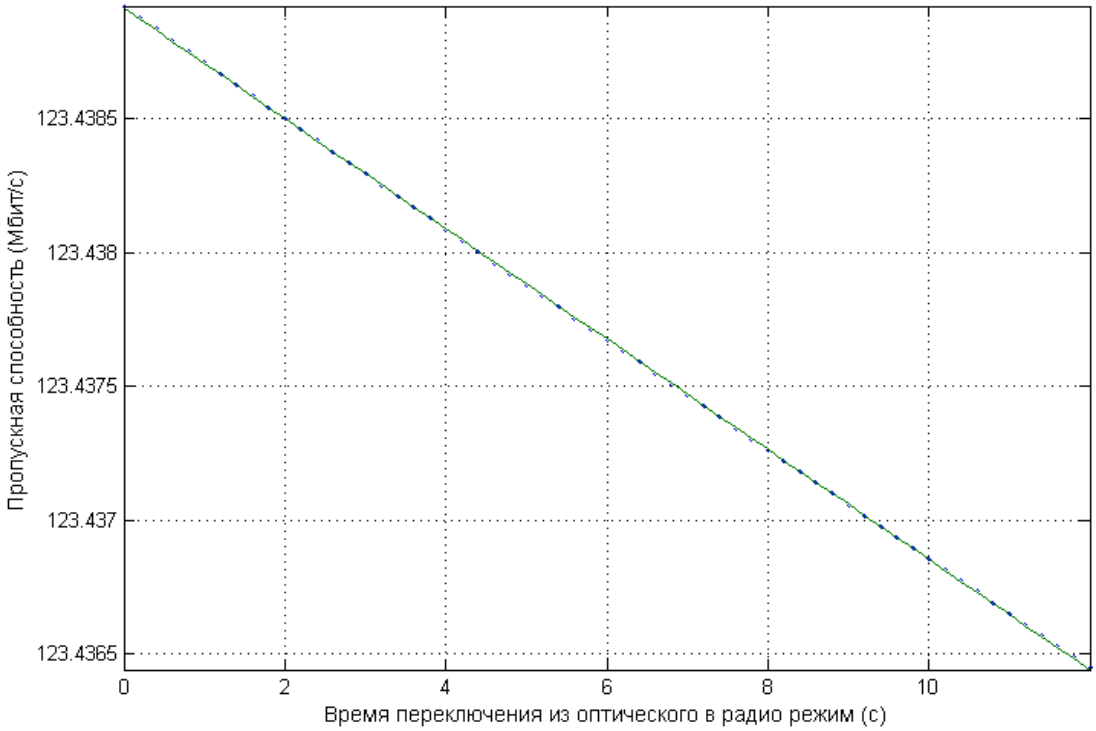

Рисунок 3.11. Зависимость пропускной способности канала связи от времен переключения из оптического в радио режим при мгновенном обратном переключении

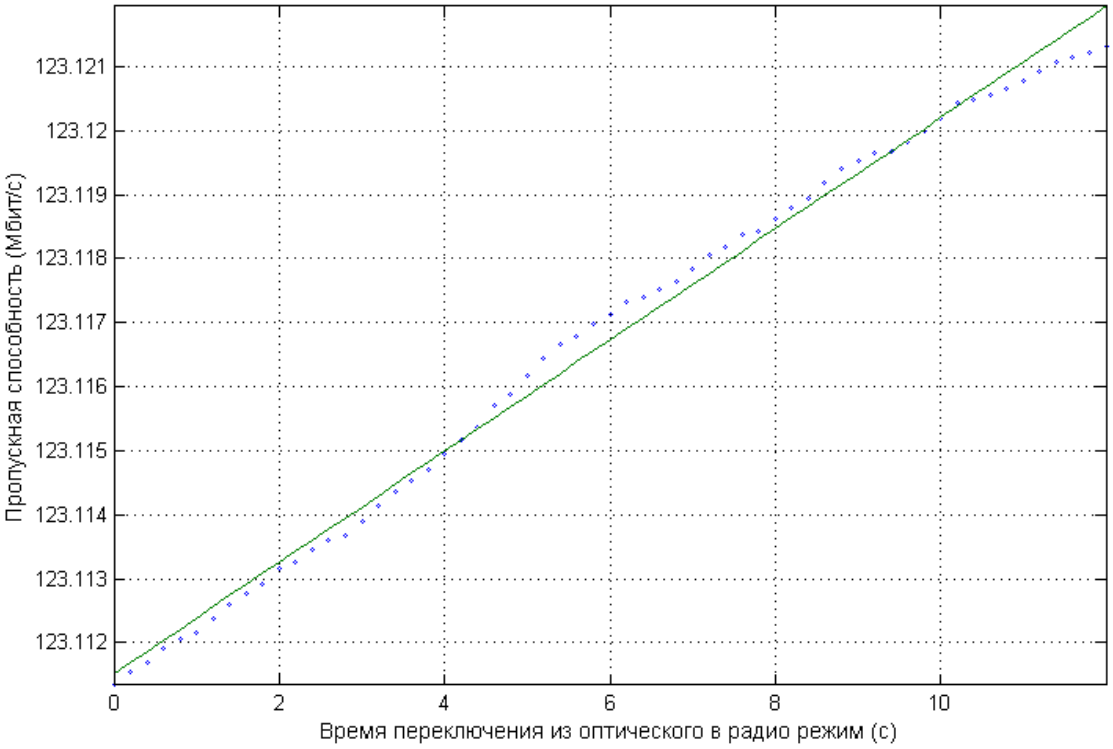

Рисунок 3.12. Зависимость пропускной способности канала связи от времен переключения из оптического в радио режим при пятиминутном обратном переключении

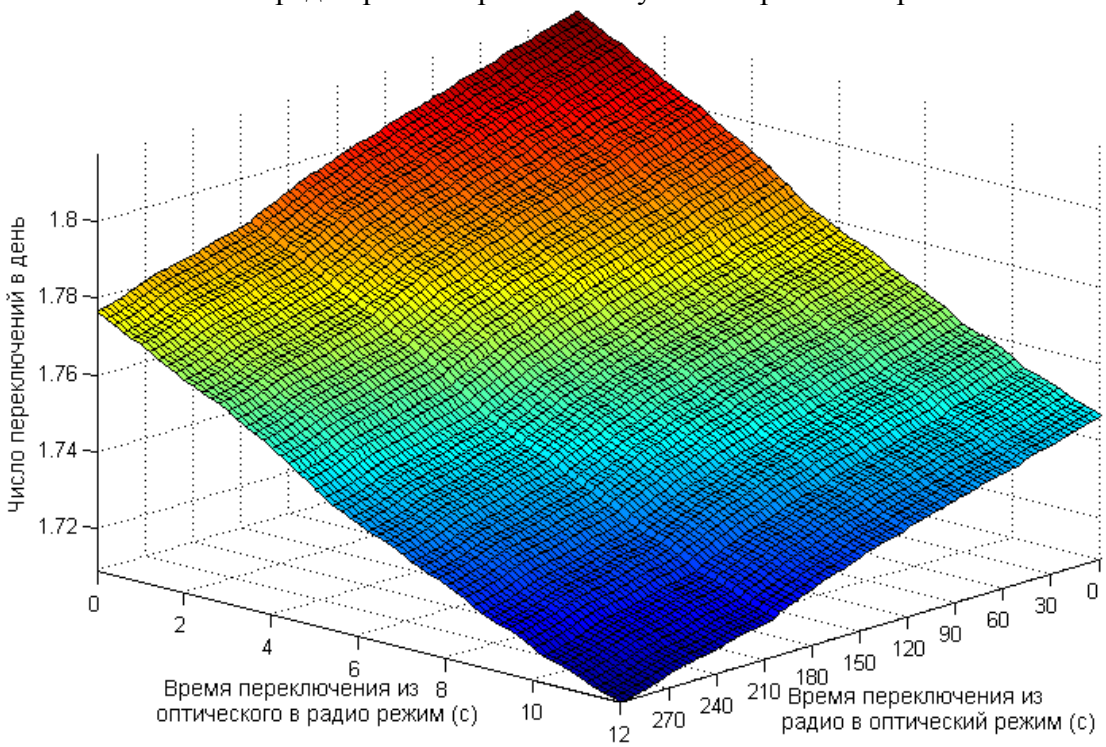

Рисунок 3.13. Зависимость числа переключений канала связи между режимами от времен переключения между ними

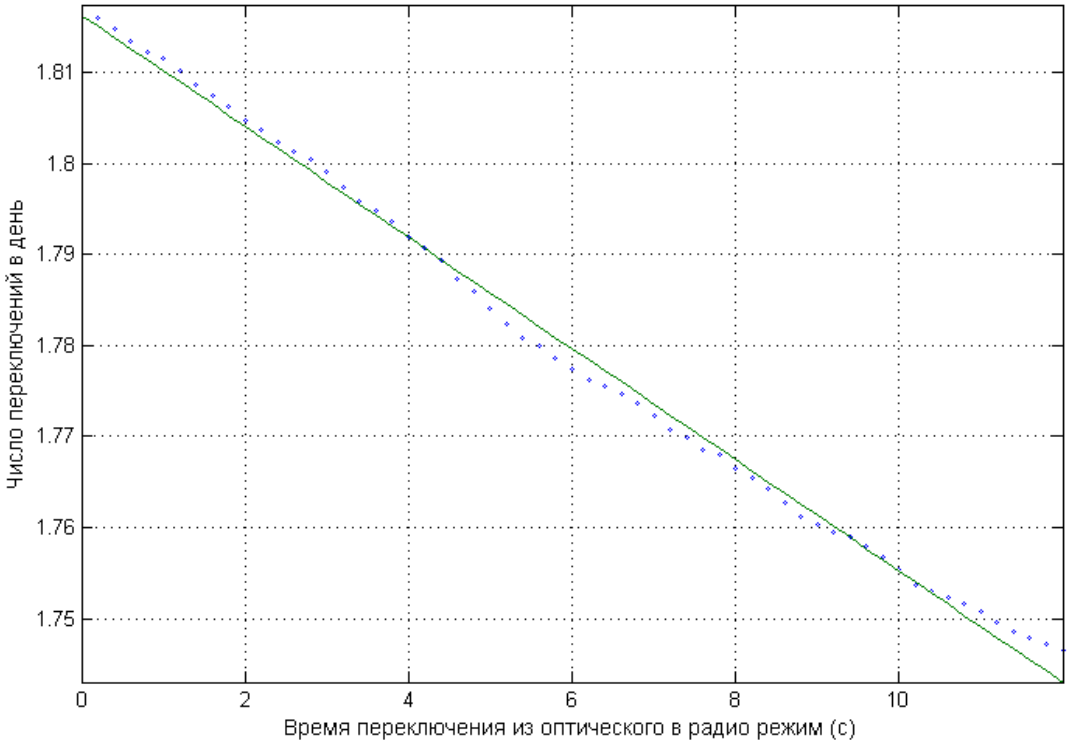

Рисунок 3.14. Зависимость числа переключений канала связи между режимами от времени переключения из оптического в радио режим при мгновенном обратном переключении

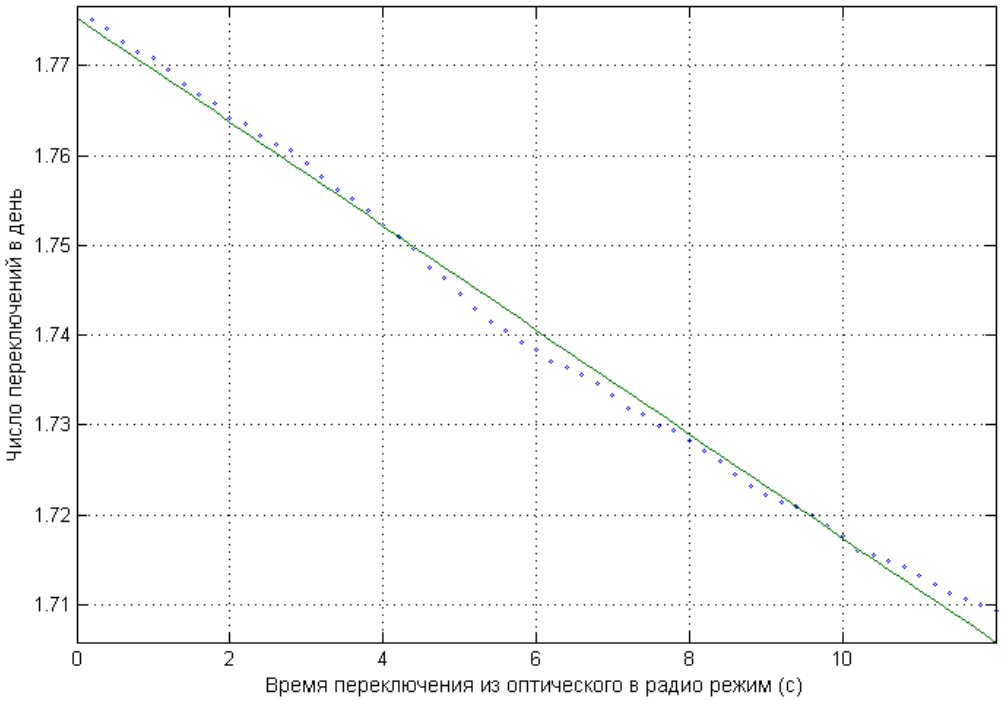

Рисунок 3.15. Зависимость числа переключений канала связи между режимами от времени переключения из оптического в радио режим при пятиминутном обратном переключении.

Еще одним важным фактором является количество переключений между режимами работы гибридного канала. Чем меньше число таких переключений, тем меньше происходит перестроений маршрутов в сети, в случае существования альтернативных

гибридному каналу маршрутов. Количество переключений, как видно из графиков, см. Рисунок 3.13, Рисунок 3.14 и Рисунок 3.15, довольно не велико, однако, при некоторых погодных явлениях канал может переключаться несколько раз подряд, что может привести к нежелательным эффектам и нарушению стабильной работы сети в целом.

Варьирование времен переключений в указанных диапазонах приводит к изменению числа переключений в пределах 5 %. Так как жестких ограничений на количество переключений не существует, то основываясь на экспериментальных данных можно лишь предсказать влияние этих времен на данный показатель, и в зависимости от требований, предъявляемых к каналу, в каждом отдельном случае принимать решение о выборе времен переключения.

На последующих графиках, см. Рисунок 3.16, Рисунок 3.17, Рисунок 3.18 и Рисунок 3.19, приведены характеристики потоков данных в зависимости от интенсивности потоков. Размер пакетов при этом имеет экспоненциальное распределение и в среднем составляет 1 килобайт. В модели канал имел буфер неограниченного размера, поэтому пакеты не терялись, а просто накапливались в буфере. При этом времена переключения T_{OR} и T_{RO} составляли 1 и 10 секунд, соответственно. Как видно из графиков, при $1 / \lambda = 0.0005$ с, средние длины очередей и времена пребывания пакетов в системе вполне приемлемы, таким образом, гибридный канал обеспечивает практически бесперебойное прохождение потоков данных с интенсивностью 2 мегабайта в секунду.

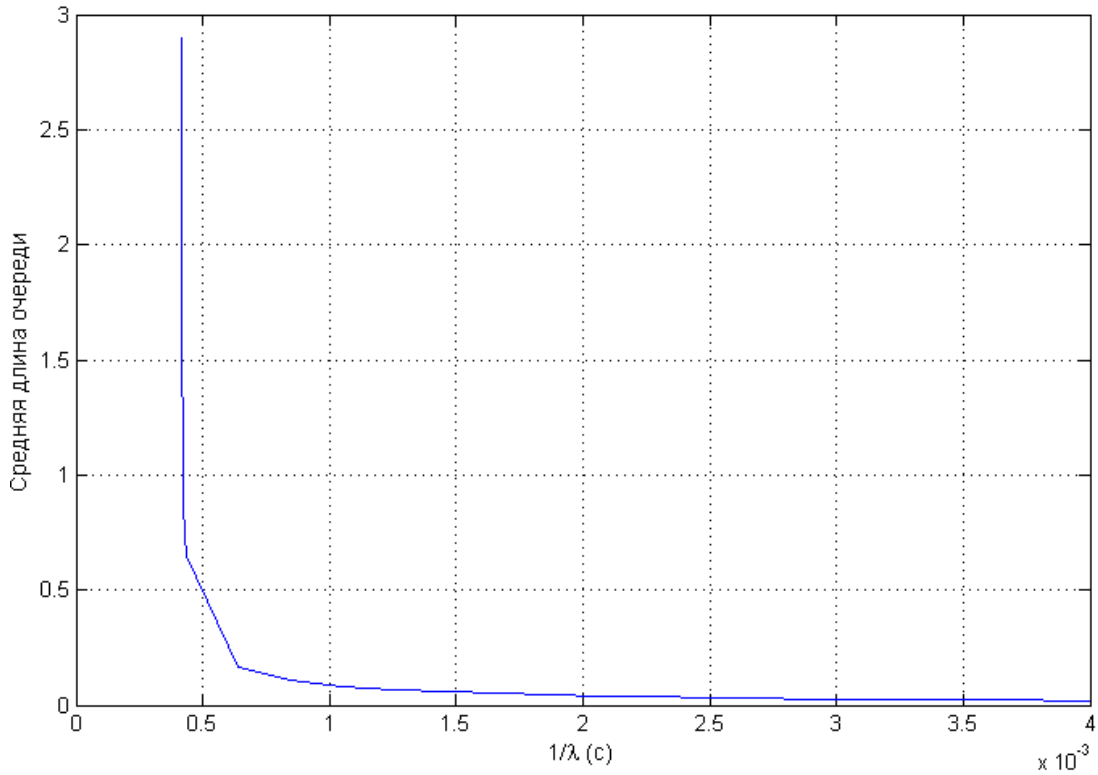

Рисунок 3.16. Зависимость средней длины очереди от интенсивности входного потока

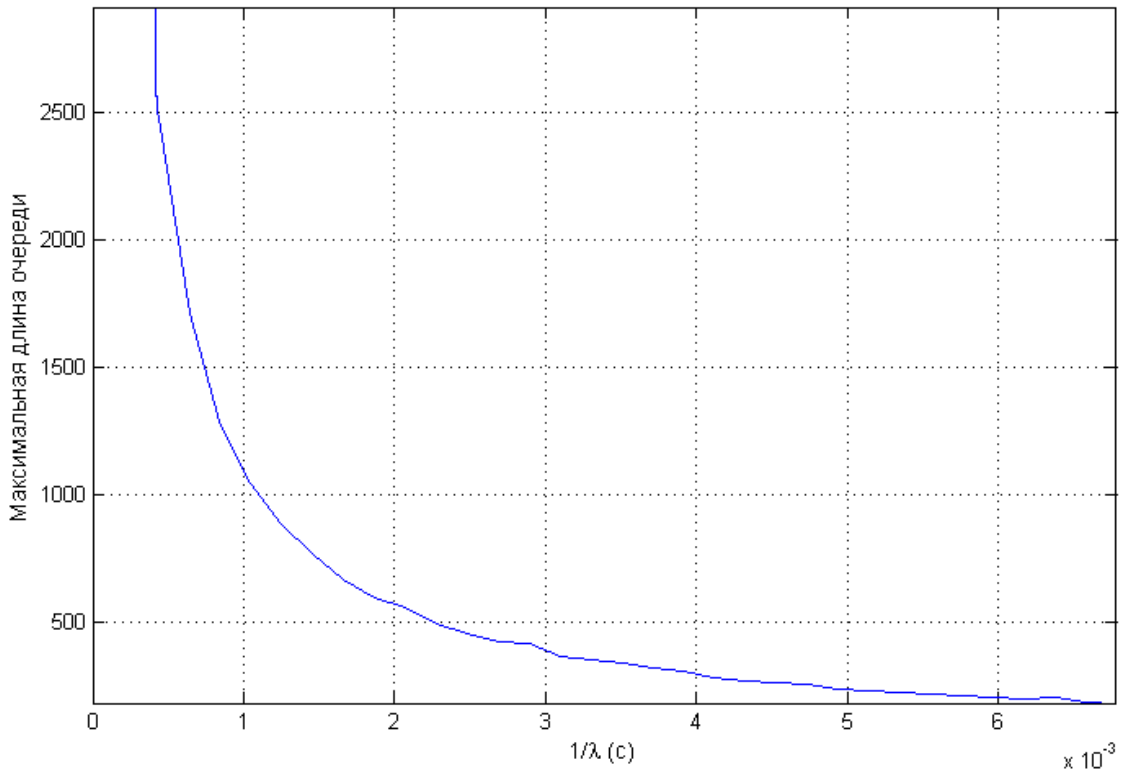

Рисунок 3.17. Зависимость максимальной длины очереди от интенсивности входного потока

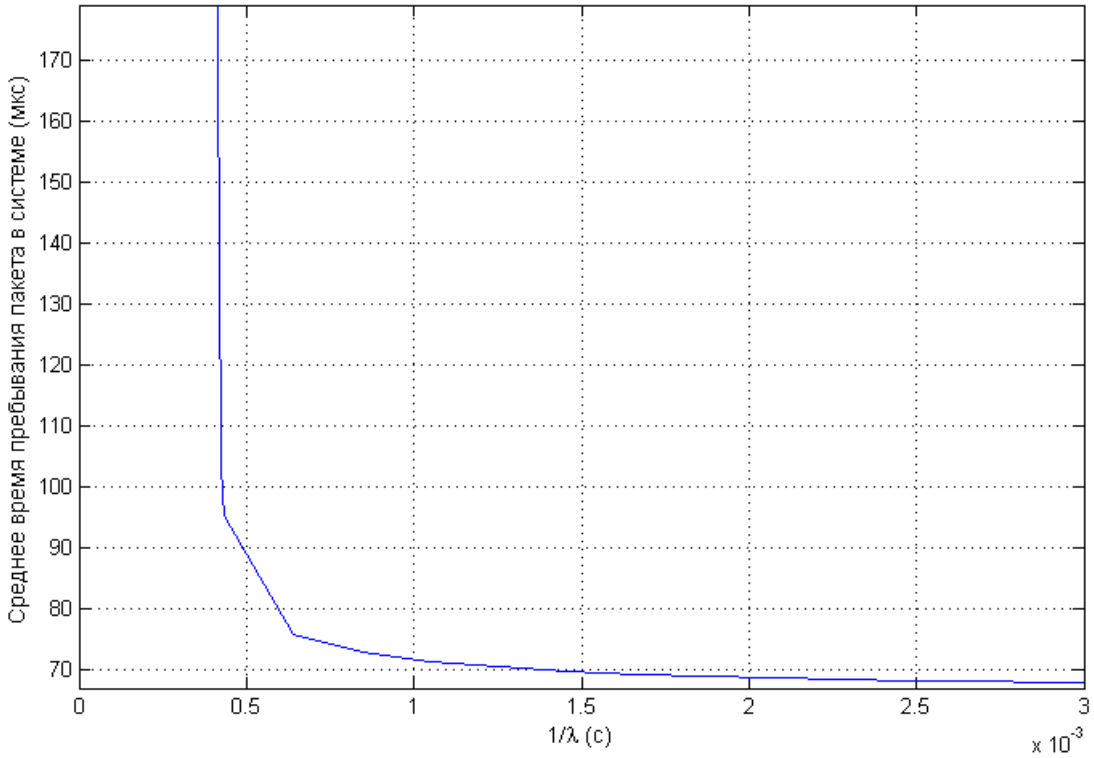

Рисунок 3.18. Зависимость среднего времени пребывания пакета в системе от интенсивности входного потока

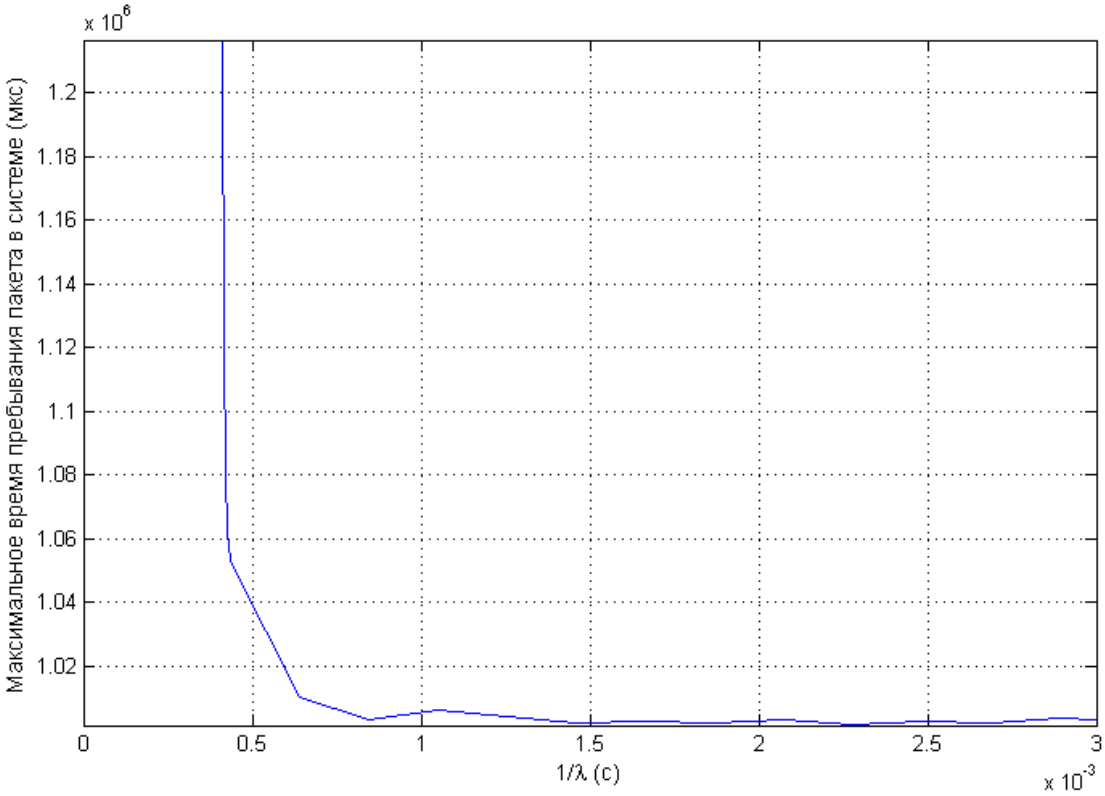

Рисунок 3.19. Зависимость максимального времени пребывания пакета в системе от интенсивности входного потока

Заметим, что максимальные длины очередей и времена пребывания пакетов в системе заметно выше средних, см. Рисунок 3.17 и Рисунок 3.19. Это объясняется тем, что во время переключения устройства из оптического в радио режим канал недоступен и

пакеты накапливаются в буфере устройства, по окончании переключения данный буфер постепенно опустошается. Так как время переключения в эксперименте составляло 1 секунду, то и максимальное время пребывания пакета в системе не может быть ниже данного значения, а количество пакетов накапливаемых в буфере за это время, определят максимальную длину очереди, и составляет не менее чем сотни пакетов, в выбранном диапазоне интенсивностей входных потоков.

Очевидно, что в случае передачи потоков в реальном времени, таких как телефонный разговор или видеоконференция, устаревшие пакеты должны просто отбрасываться из буфера без попытки передачи, в этом случае, связь будет прерываться на время переключения из оптического в радиорежим и затем сразу восстанавливаться, так как пакеты практически не будут накапливаться в буфере канала.

Приведенный в данном разделе анализ полученных численных результатов имитационного моделирования демонстрирует ограничения времен переключения, накладываемые требованиями, предъявляемыми к доступности канала и позволяет подобрать времена переключения в зависимости от прочих требований предъявляемых к радиоканалу. Он также позволяет оценить основные характеристики канала и проходящих через него потоков данных.

3.4 Сопоставление результатов моделирования с результатами расчетов.

Для проверки адекватности разработанных моделей было проведено сопоставление результатов полученных с помощью имитационной модели и модели использующей аналитические расчёты.

Для сравнения были выбраны следующие характеристики системы:

1. Средняя длина очереди заявок в системе
2. Среднее время ожидания заявки в очереди
3. Средняя пропускная способность системы

Первым этапом были сопоставлены результаты моделирования тривиальных случаев. Такая проверка дает возможность проверить, что обе модели принципиально работают верно и дают схожие результаты. Прежде всего, был рассмотрен случай, когда погода остается постоянной и работает только один канал – либо оптический, либо радиоканал. Расчеты проводились для следующих входных параметров (Таблица 3.5):

Таблица 3.5. Описание входных параметров.

Параметр	**Значение**
Пропускная способность оптического канала	125 Mbps

Пропускная способность радиоканала	20 Mbps
Среднее время между поступлением заявок	0.1-1 мс
Средний размер макетов	1024 Байт

В результате моделирования были получены следующие зависимости для средней длины очереди заявок в системе от интенсивности входящего потока заявок, при условии, что работает только оптический канал:

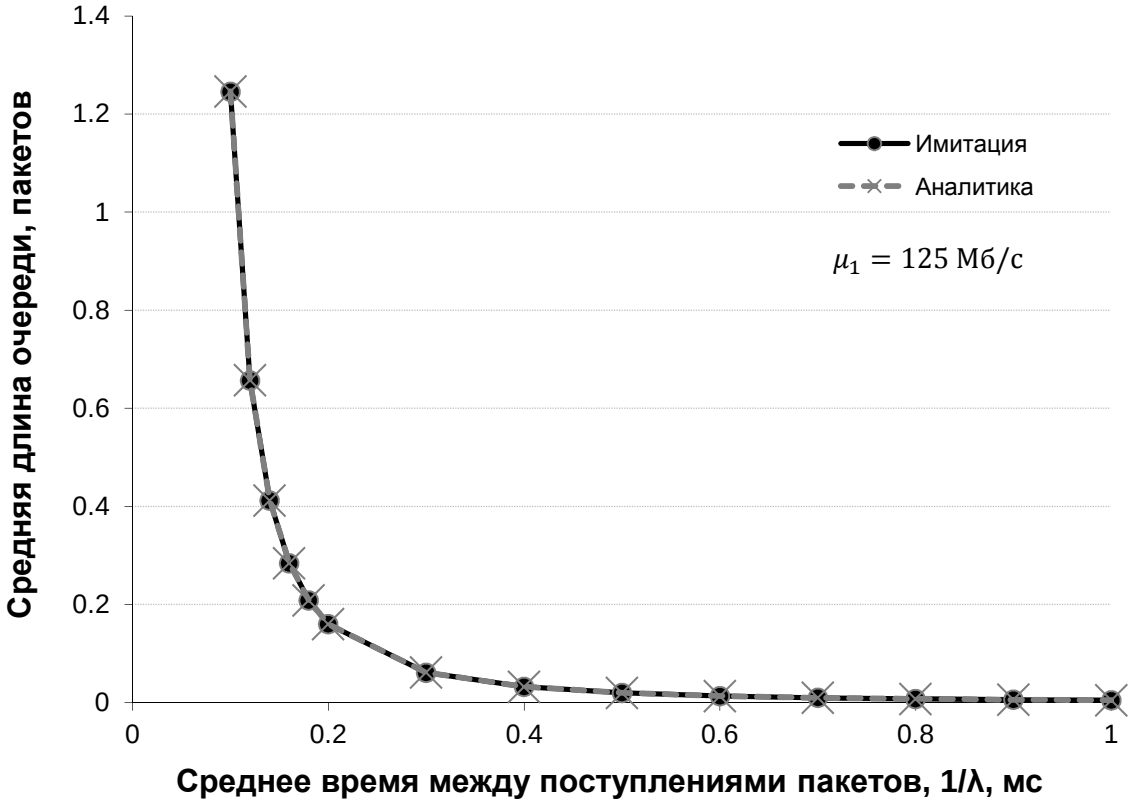

Рисунок 3.20. Зависимость средней длины очереди от интенсивности входящего потока

Как можно видеть из представленных графиков (Рисунок 3.20, Рисунок 3.21), результаты, полученные с помощью аналитической модели и имитационной модели очень хорошо совпадают, расхождение наблюдается только в 4-м знаке.

Следующим этапом было проведение расчетов модели когда, работают оба канала одновременно, но параметры погоды остаются неизменными. Результаты также показали очень хорошее совпадение и представлены на графике ниже.

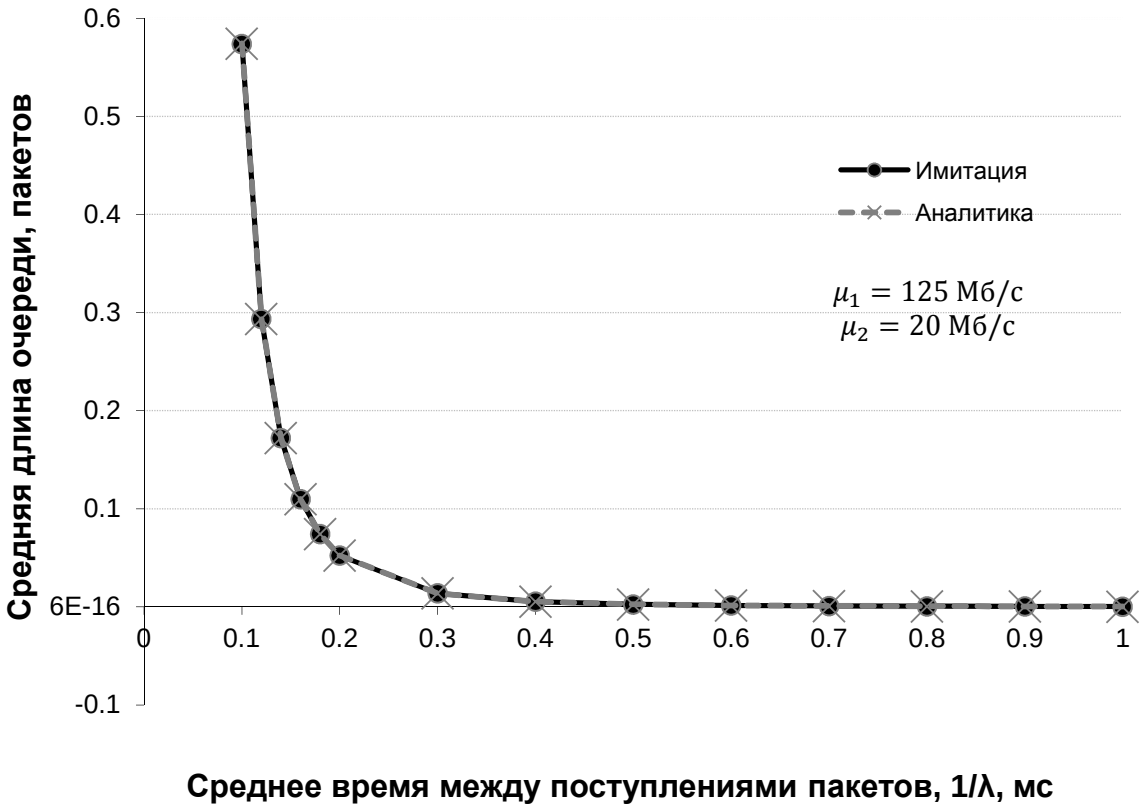

Рисунок 3.21. Зависимость средней длины очереди от интенсивности входящего потока

После того, как модели были отлажены на тривиальных примерах, было проведено полноценное сравнение полученных результатов, когда происходили изменения параметров погоды. Варьирование проводилось по интенсивности входящего потока заявок. Кроме того, в данном эксперименте параметры системы уже были приближены к параметрам современных устройств, т.е. оба канала имели скорость 1024 Мб/с, а средний размер пакета был равен 1 Мбайт. Такое сопоставление позволяет не только сравнить численные результаты для конкретных входных параметров, но и убедиться в том, что качественно поведение моделей не отличается. Ниже на графике (Рисунок 3.22) представлено 2 зависимости средней длины очереди в гибридной системе от среднего интервала поступления заявок в гибридную систему. Первая зависимость (сплошная линия) была получена с помощью имитационной модели. Вторая же (штрихпунктирная линия) была получена с помощью аналитической модели с аналогичными входными параметрами.

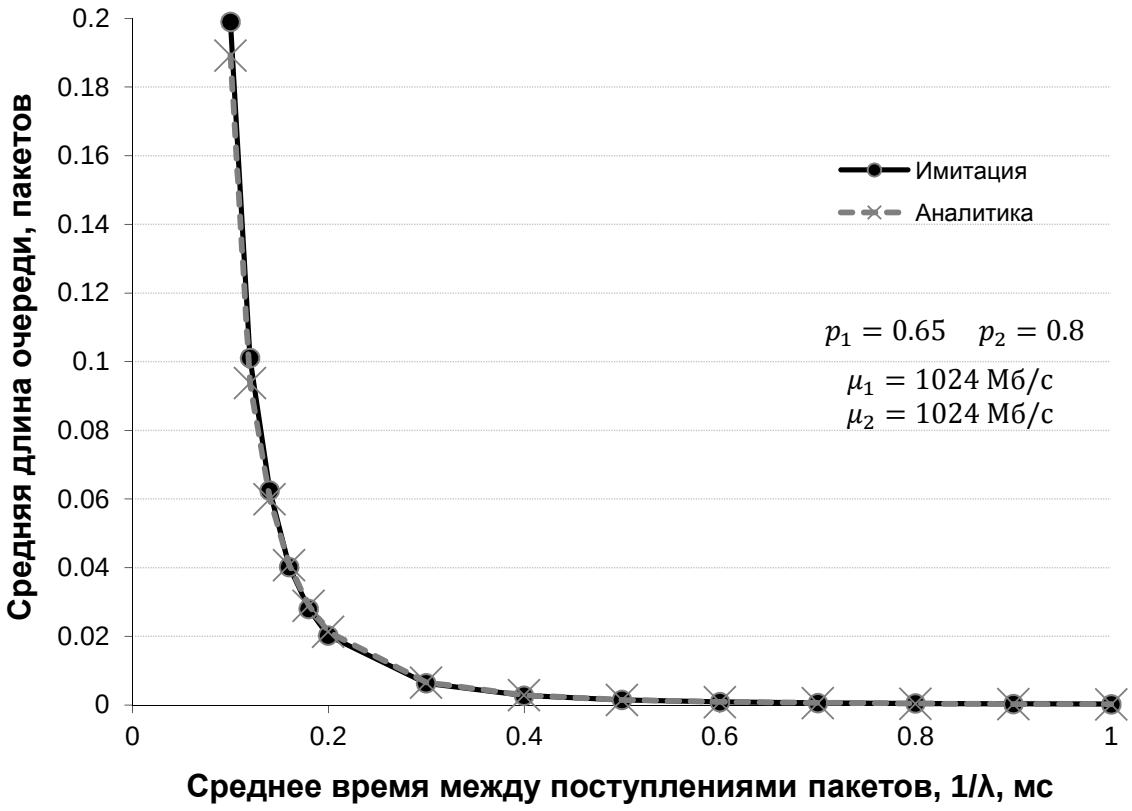

Рисунок 3.22. Зависимость средней длины очереди от интенсивности входящего потока

Таким образом, полученные результаты показывают, что допущения, сделанные при построении моделей, являются уместными и качественно на результат и поведение гибридной системы не влияют. При этом они позволили существенно упросить, как имитационную модель, позволив значительно сократить время расчетов, так и аналитическую модель, позволив решить полученные уравнения в аналитическом виде, не прибегая к помощи численных методов.

4. Разработка схемотехнических решений интерфейса, поддерживающего технологию переключения между основным (оптическим) и резервным (радио) каналами

4.1. Разработка и исследование механизмов и алгоритмов переключения между основным и резервным каналами

Гибридная система включает более одного канала связи (в общем случае три канала). В связи с этим возникает проблема выбора активного канала и механизма переключения между каналами. Поскольку атмосферная оптическая линия является основной в гибридной системе, то очевидно именно статус этой линии и должен определять в какой момент должно происходить переключение между каналами: если в лазерном канале обнаружена потеря связи, то должно происходить переключение на радиоканал. Аналогично, как только в лазерном канале восстанавливается связь, то он выбирается в качестве активного. Однако предположение о том, что информация об уровне сигнала доступна, может быть проблематичным. Тем не менее, в большинстве работ [17, 18, 49,50] предполагается, что эта информация имеется в распоряжении, она достаточно точна и предоставляется своевременно.

Кроме того, чтобы обеспечить бесперебойную связь, в гибридной системе необходимо гарантировать синхронизацию приемопередатчиков, образующих канал и находящихся на достаточном удалении друг от друга. Для этого может быть применено множество подходов. Например, для передачи необходимой служебной информации может быть использован еще один дополнительный надежный канал. Другой вариант заключается в использовании механизма самосинхронизации. Более простые системы обычно страдают от больших промежутков времени потери связи (LLT, link loss times) во время переключения каналов.

Операция переключения может быть выполнена с помощью широкого круга систем, работающих на различных уровнях семиуровневой модели взаимодействия открытых систем OSI. Выбор конкретной системы основывается на таких параметрах, как время реакции на изменяющиеся условия (т.е. задержка), ограничения по пропускной способности и время LLT. Однако зачастую оказывается, что требования на быстрый отклик системы, эффективное использование пропускной способности и надежность являются несовместимыми, тем самым при проектировании гибридной системы необходимо выбирать наиболее важную для поставленной перед ним задачи характеристику.

Наиболее простой способ реализации механизма переключения заключается в сравнении уровня полученного оптического сигнала (ORSS, optical received signal strength) с

пороговым значением. Однако данный метод подвержен негативному влиянию со стороны колебаний в уровне сигнала ORSS, что как следствие приводит к недопустимым временам потери связи LLT. Такое поведение сохраняется вне зависимости от того, совпадает ли порог уровня приема сигнала с чувствительностью приемника или нет. Таким образом, необходимо рассмотреть другие алгоритмы для механизма переключения, включая временной и мощностной гистерезис, фильтрацию и различные их комбинации.

Однако какой бы алгоритм не был выбран, в любом случае необходимо прийти к компромиссу между надежностью системы, т.е. доступностью канала, и эффективным использованием пропускной способности. Поскольку пропускная способность радиоканала обычно меньше чем у лазерного атмосферного канала (особенно если в гибридной системе используется низкочастотный радиоканал), то общая средняя пропускная способность гибридной системы будет зависеть не только от коэффициента доступности атмосферного лазерного канала, но и от неполного использования лазерного канала, которое определяется выбором механизма переключения. Хотя обычно основной целью построения гибридных систем является увеличение надежности связи, но также не стоит забывать и о пропускной способности. Поэтому кроме ограничения на доступность системы в целом, необходимо также установить верхний порог неиспользования атмосферного лазерного канала, что позволяет гарантировать минимальную пропускную способность.

Применение мощностного гистерезиса достаточно широко распространено в различных областях электроники, связи и обработки сигналов. Целью использования мощностного гистерезиса является сглаживание нежелательных колебаний в уровне оптического сигнала, тем самым предотвращая слишком частые операции по переключению между каналами. Функция гистерезиса должна быть определена так, чтобы она зависела от амплитуды колебаний сигнала. Более того, чтобы гарантировать увеличение коэффициента доступности всей гибридной системы в целом, необходимо чтобы нижний порог был установлен в значение большее или равное чувствительности приемника. Установив более высокий порог можно добиться еще большего коэффициента доступности системы. С другой стороны более высокий порог должен быть установлен для того, чтобы флуктуации в уровне оптического сигнала не вызывали операцию переключения до тех пор пока в атмосферном лазерном канале не начнут возникать ошибки. Однако более высокий порог может помешать вовремя обнаружить критические изменения в канале, что неизбежно приведет к временной потере связи и как следствие уменьшению доступности всей гибридной системы в целом.

Временной гистерезис это другой способ, оперирующий непосредственно со значениями уровня оптического сигнала и также позволяющий предотвратить уменьшение

производительности гибридной систем из-за многочисленных операций переключения. В данном алгоритме определяется только одно пороговое значение, которое опять же должно быть выше или равно чувствительности приемника. Если уровень оптического сигнала в приемнике пересекает пороговое значение, то механизм продолжает следить за уровнем сигнала в течение определенного периода ожидания *T*. Если за этот период уровень порогового значения больше не пересекался, то производится операция переключения. В противном случае таймер отсчитывающий период ожидания сбрасывается.

В отличие от радиоканала, атмосферный оптический канал не подвержен постепенному ухудшению качества связи, а теряет связь резко во время наступления тумана. Таким образом, флуктуации не только вызывают уменьшение пропускной способности, но и полную потерю связи. Поэтому чтобы удовлетворить требованиям доступности гибридного канала, временной гистерезис применяется только для переключения с радиоканала на атмосферный лазерный канал. Как только АОЛС (атмосферная оптическая линия связи) теряет связь, тут же происходит операция переключения на радиоканал. При таком подходе, флуктуации и вызванные ими периоды времени, когда в АОЛС преобладают ошибки, могут не учитываться, т.к. в это время будет активен радиоканал.

Фильтрация это еще один способ уменьшить колебания в значениях уровня оптического сигнала. В любом случае фильтр должен обладать характеристиками фильтра нижних частот, чтобы выходной сигнал отражал долгосрочные изменения в уровне сигнала вызванные изменениями погодных условий и в тоже время по возможности избавлял от случайных колебаний. Тип и порядок фильтра N может быть выбран произвольно, исходя из условия обеспечения наибольшей доступности гибридного канала. Например, может быть использован фильтр со скользящей средней (MA, Moving average) или с экспоненциально взвешенной скользящей средней (EWMA, exponentially weighted moving average). Однако фильтры должны быть спроектированы очень аккуратно, сглаживая выходной сигнал и в тоже время позволяя своевременно обнаружить критические изменения в уровне оптического сигнала. Как показано в работе, фильтры, примененные к ORSS, сглаживают сигнал, устраняя нежелательные колебания. С точки зрения сглаживания наилучшие результаты дает метод скользящей средней, однако, с другой стороны, он не позволяет своевременно отреагировать на критические изменения в уровне сигнала. Фильтры высоких порядков также страдают от этой проблемы. Фильтр EWMA не дает такого сглаживания сигнала, как обычный MA, зато он позволяет быстро реагировать на потерю связи в канале. Таким образом, должен быть найден компромисс, какой фильтр и какого порядка взять за основу. После применения фильтра к сигналу, может быть

использован обычный алгоритм сравнения с пороговым значением. Если коэффициент передачи фильтра равен 1, то пороговое значение должно быть больше или равно чувствительности приемника. Если же коэффициент передачи фильтра больше 1, то возможны даже более низкие пороговые значения.

Очевидно, также возможно использование более одного из описанных выше методов последовательно применяя каждый из них. Однако в работе [17] показано, что комбинированные методы не дают никакого ощутимого преимущества по сравнению с механизмами, основанными на временном или мощностном гистерезисе или фильтрации в отдельности.

Основным критерием переключения каналов гибридной линии связи для передачи мультимедийного трафика должно быть качество соединения основного канала связи. В нашем случае – это оптический канал, ввиду его приоритетности перед радиоканалом. Поэтому трафик между каналами переключается по критерию качества оптического соединения АОЛС.

В случае, когда резервный канал связи имеет меньшую скорость передачи данных, чем основной канал, необходимо иметь возможность настройки параметров переключения. При этом в режиме работы резервного канала должна быть использована специальная технология плавного снижения скорости, которая позволяет улучшить алгоритмы взаимодействия оборудования с подключаемыми сетевыми устройствами. Для расширения круга решаемых задач на сигнальный стык резервного канала выводится устройство питания по технологии PoE (Power over Ethernet). Параметрами его включения можно также программно управлять.

На Рисунке 4.1 приведен алгоритм управления устройством переключения гибридного канала со ссылками на ассемблерные метки.

В используемой версии программы в качестве критерия исправности оптического канала применяется признак успешного приема телеметрического пакета. Причем в интервал времени не превышающий значение 1 сек. А в составе принятого пакета должен быть установлен аналогичный признак о состоянии приема на удаленной стороне. В противном случае при наличии LINK резервного канала происходит переход на резервный канал.

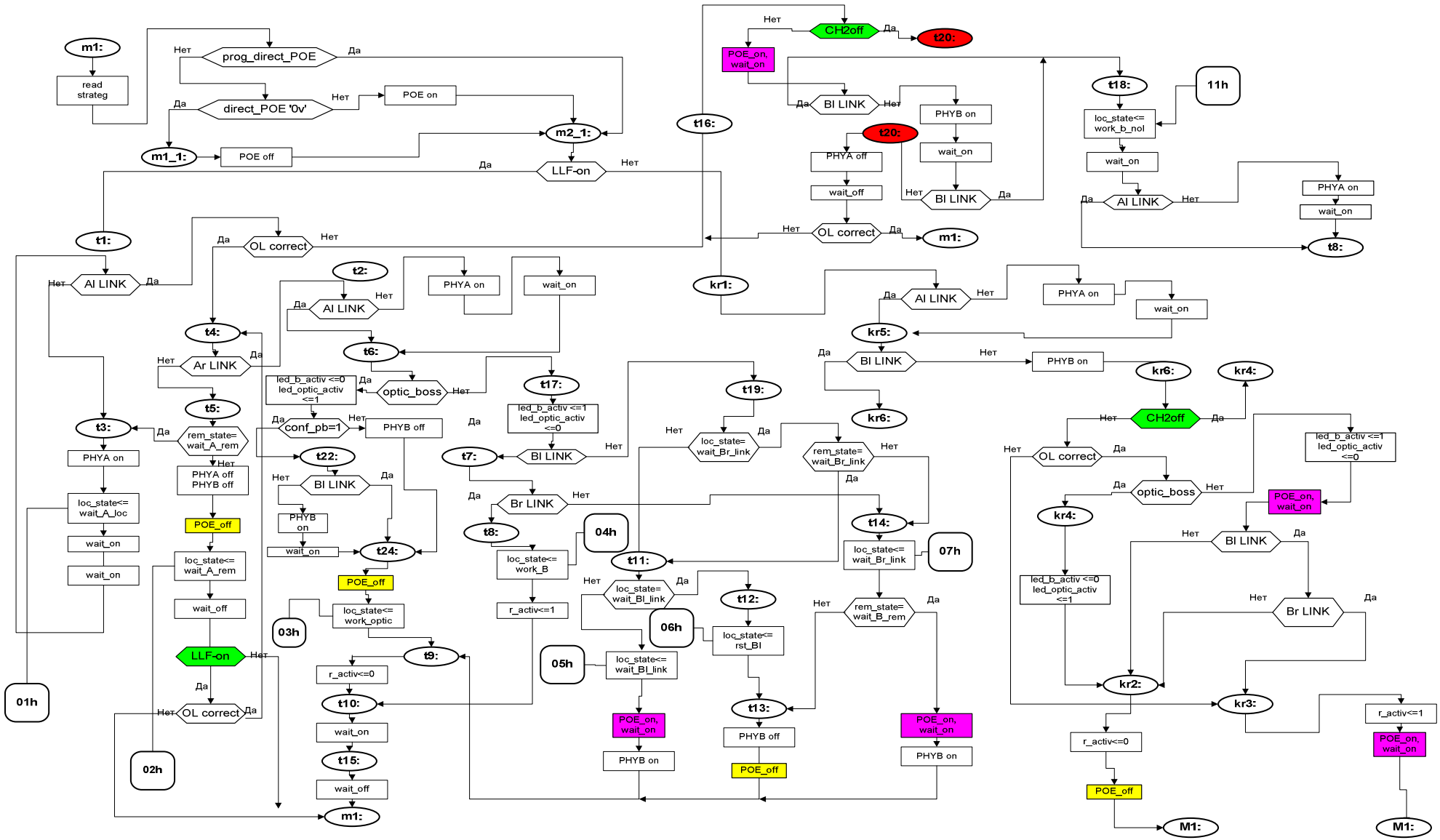

Рисунок 4.1. Алгоритм управления устройством переключения гибридного канала

На Рисунке 4.2 представлен участок алгоритма определения состояния основного оптического канала связи.

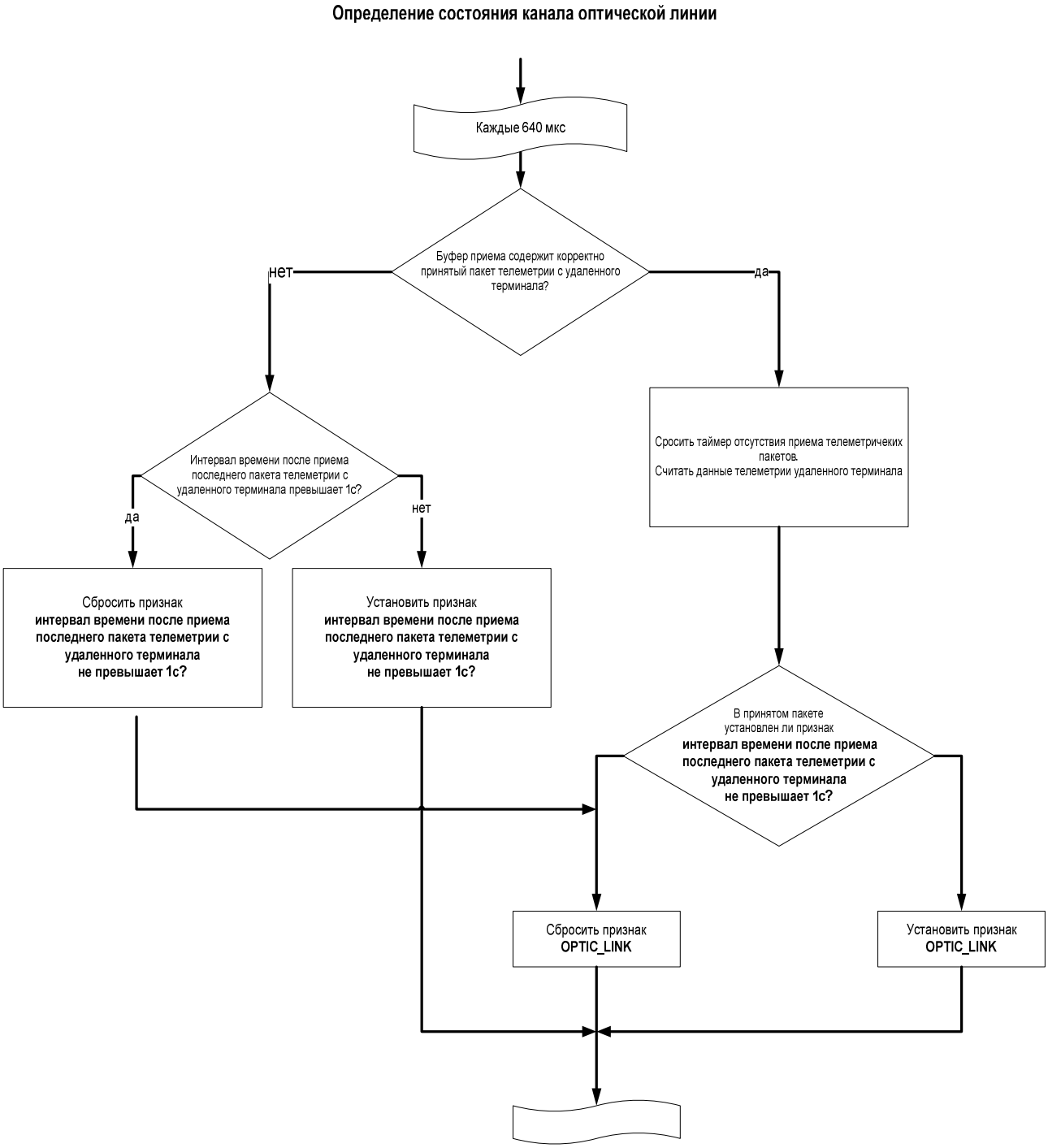

Рисунок 4.2. Алгоритм определения состояния основного канала связи

Обратный переход на оптический канал (если он является основным) происходит при восстановлении приема телеметрических пакетов Local и Remote.

В используемой версии программы производится подготовка исходных данных для количественной оценки BER по приему всех входящих пакетов.

В Atmel считываются два параметра – число интервалов (80 нс) и число неверно принятых байт (или в случае отсутствия связи число пропущенных байт) за отчетный период опроса Atmel. Оценка BER как о Local так и Remote назад в FPGA не приходит.

На Рисунке 4.3 представлен участок алгоритма включения/выключения резервного канала связи.

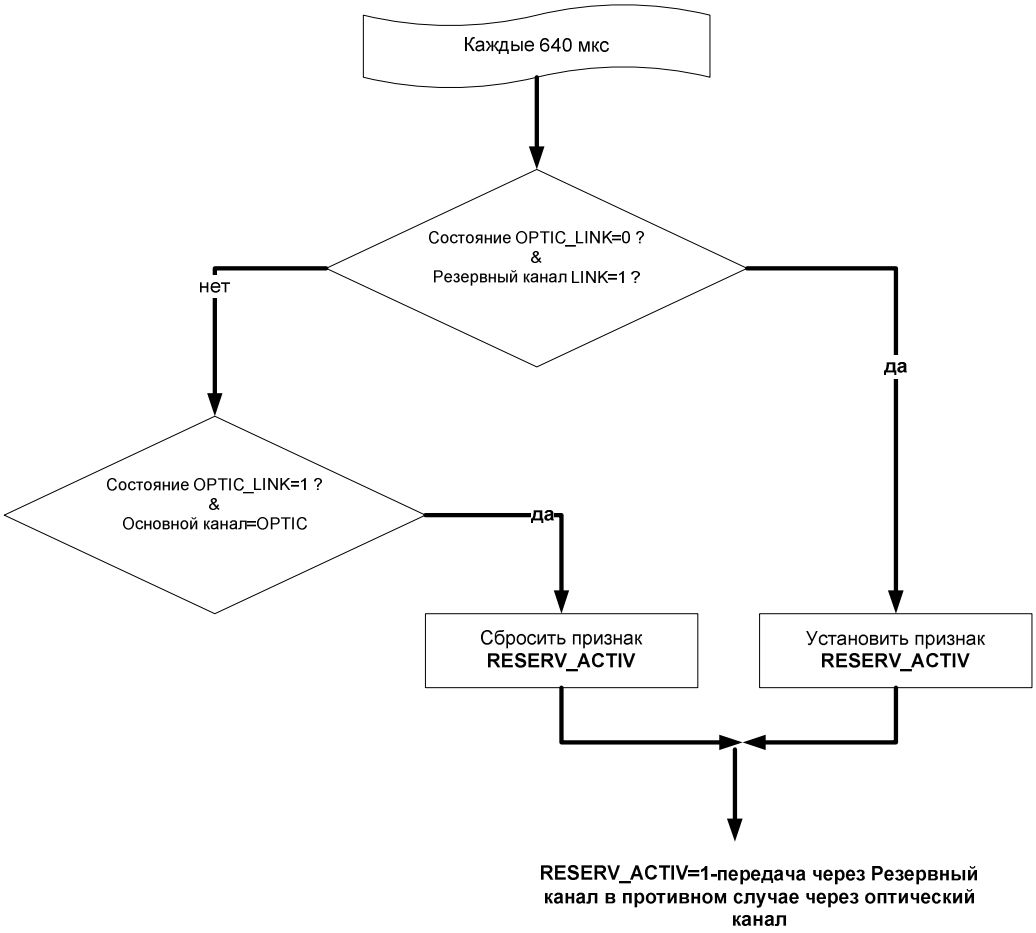

Рисунок 4.3. Алгоритм включения/выключения резервного канала связи

Для реализации переключения по BER необходимо вернуть данные в FPGA. Вероятно, что для этого достаточно мантиссы Local, Remote.

Детализация не указанного пути привела бы к необходимости заново нарисовать весь алгоритм управления устройством переключения гибридного канала связи. В качестве альтернативы выделяем на общем алгоритме интересующие участки (фрагменты алгоритма управления) после оценки состояния связи. Данные фрагменты представлены на Рисунке 4.4 и Рисунке 4.5.

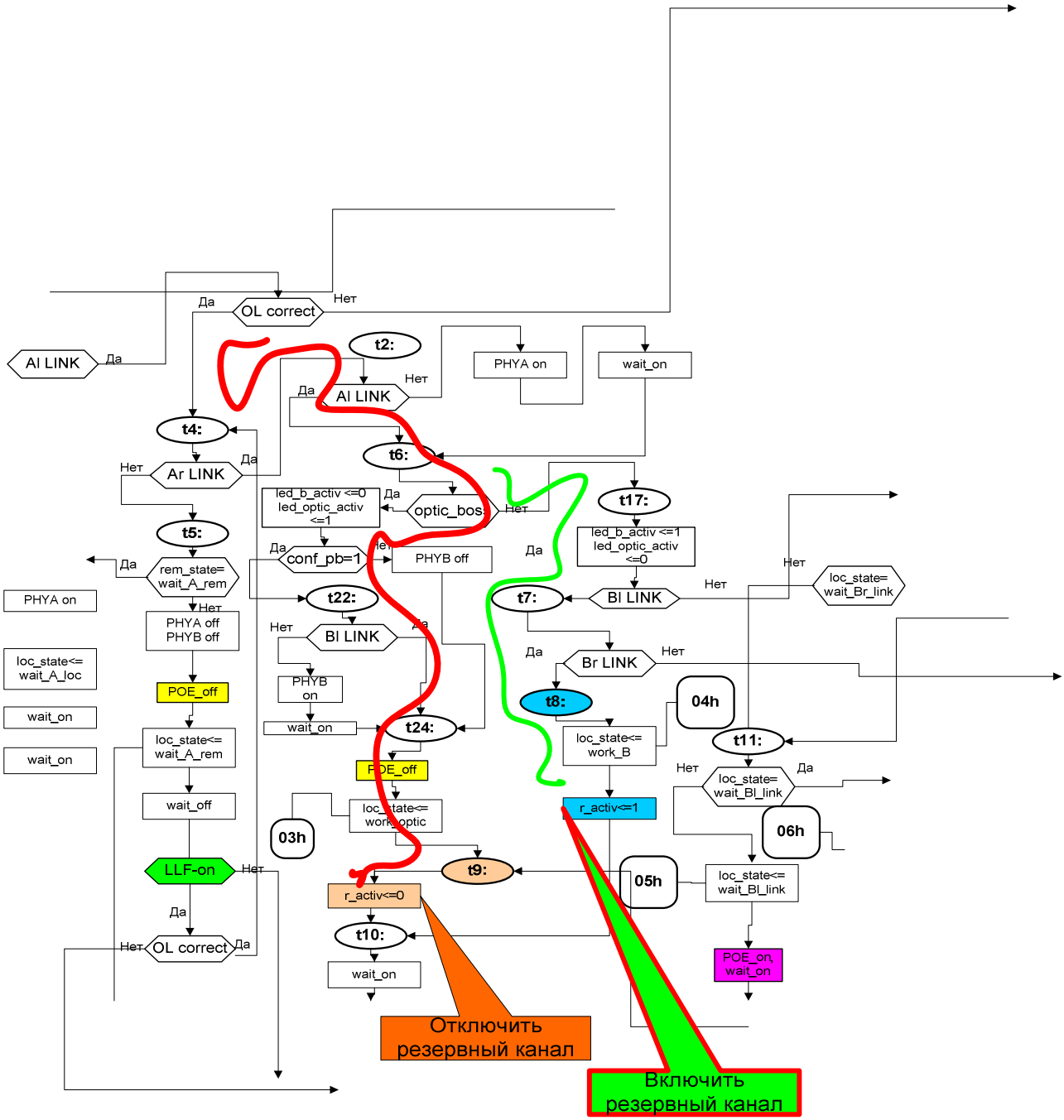

Рисунок 4.4. Алгоритм функционирования устройства переключения каналов (фрагмент 1 алгоритма управления)

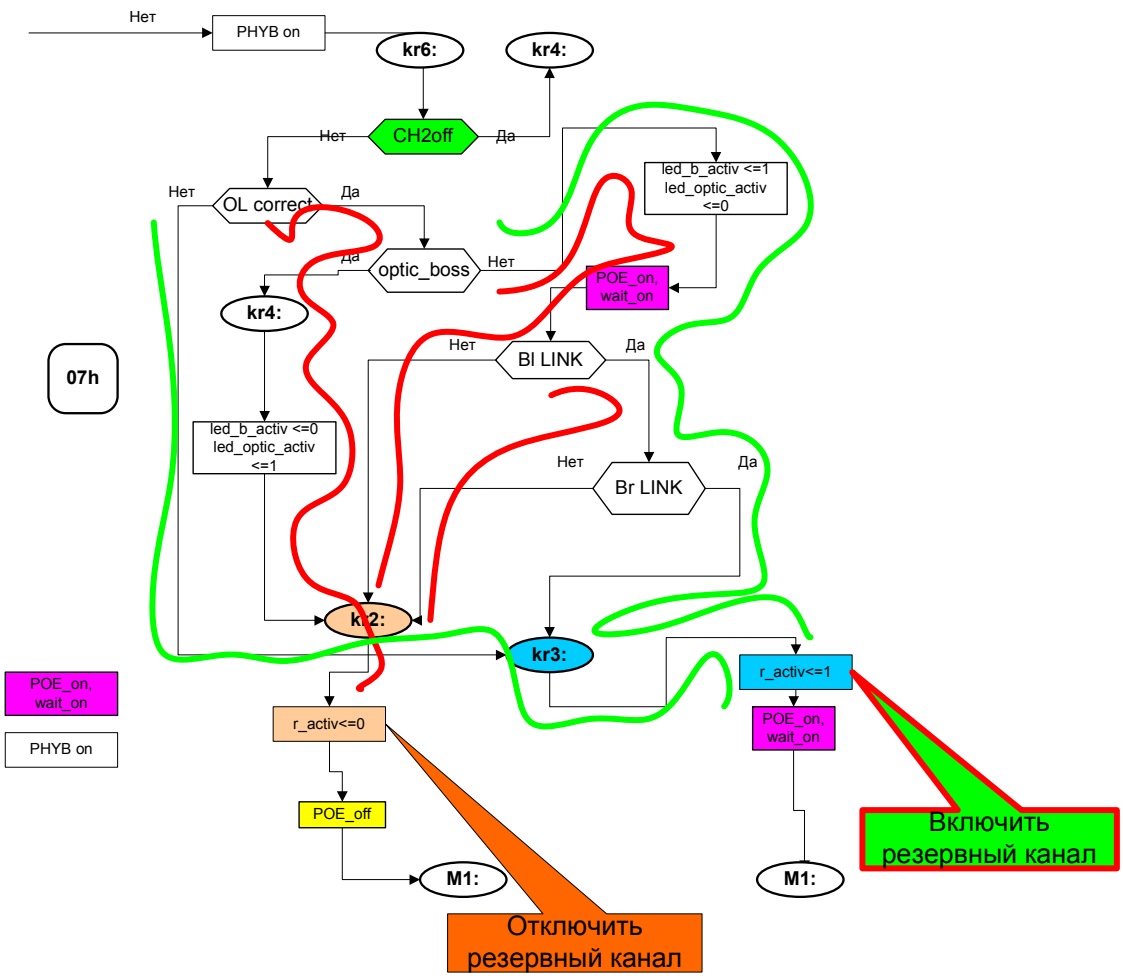

Рисунок 4.5. Алгоритм функционирования устройства переключения каналов (фрагмент 2 алгоритма управления)

Оценка метрологической корректности состояния оптической линии связи на основе измерения качества приема телеметрических пакетов в условиях различного трафика передачи данных иллюстрируют приведенные ниже рисунки. Наблюдения выполнены посредством использования комплекта программ ChipScopePro Software.

Фрагмент захвата передачи последовательности из 8 телеметрических пакетов для трафика данных по Ethernet приведен на Рисунке 4.6. Причем длина пакета Lp = 64 байта, а межпакетный интервал IFG = 13 байт. Условия старта события (красная отметка) - фронт start_transm + тип пакета - телеметрия (strt_data_pac = 0). Временная шкала – count_tic приведена в десятичном представлении количества интервалов байтов передачи (80 нс). Для данного случая интервал между телеметрическими пакетами (ИТП) составляет величину 204960 мкс.

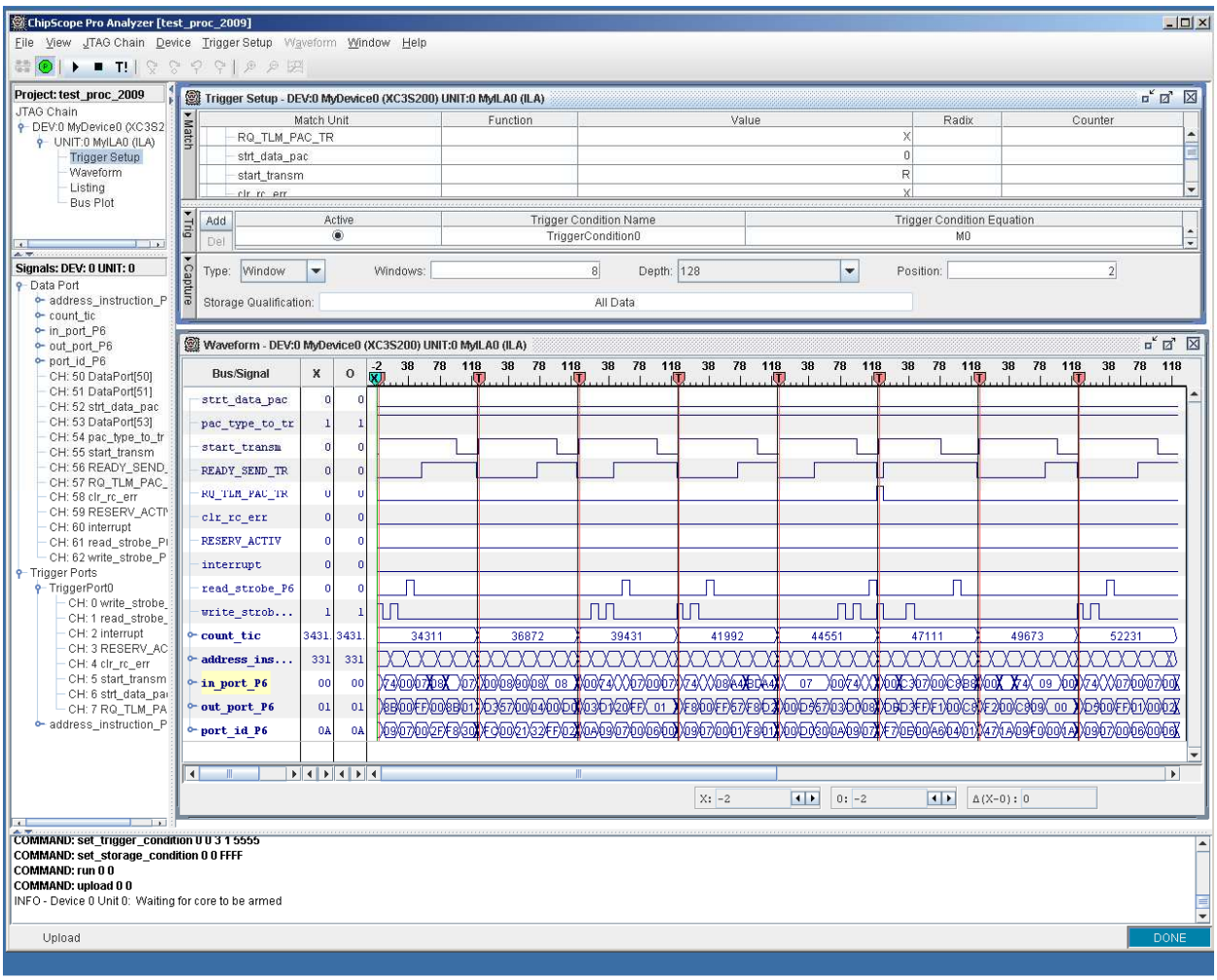

Рисунок 4.6. Фрагмент захвата передачи последовательности при Lp = 64 байт, IFG = 13 байт, ИТП = 204960 мкс

На Рисунке 4.7 представлен фрагмент захвата передачи той же последовательности из 8 телеметрических пакетов, когда длина пакета Lp = 64 байта, а межпакетный интервал IFG = 64 байт. Для данного случая интервал между телеметрическими пакетами (ИТП) составляет величину 204640 мкс.

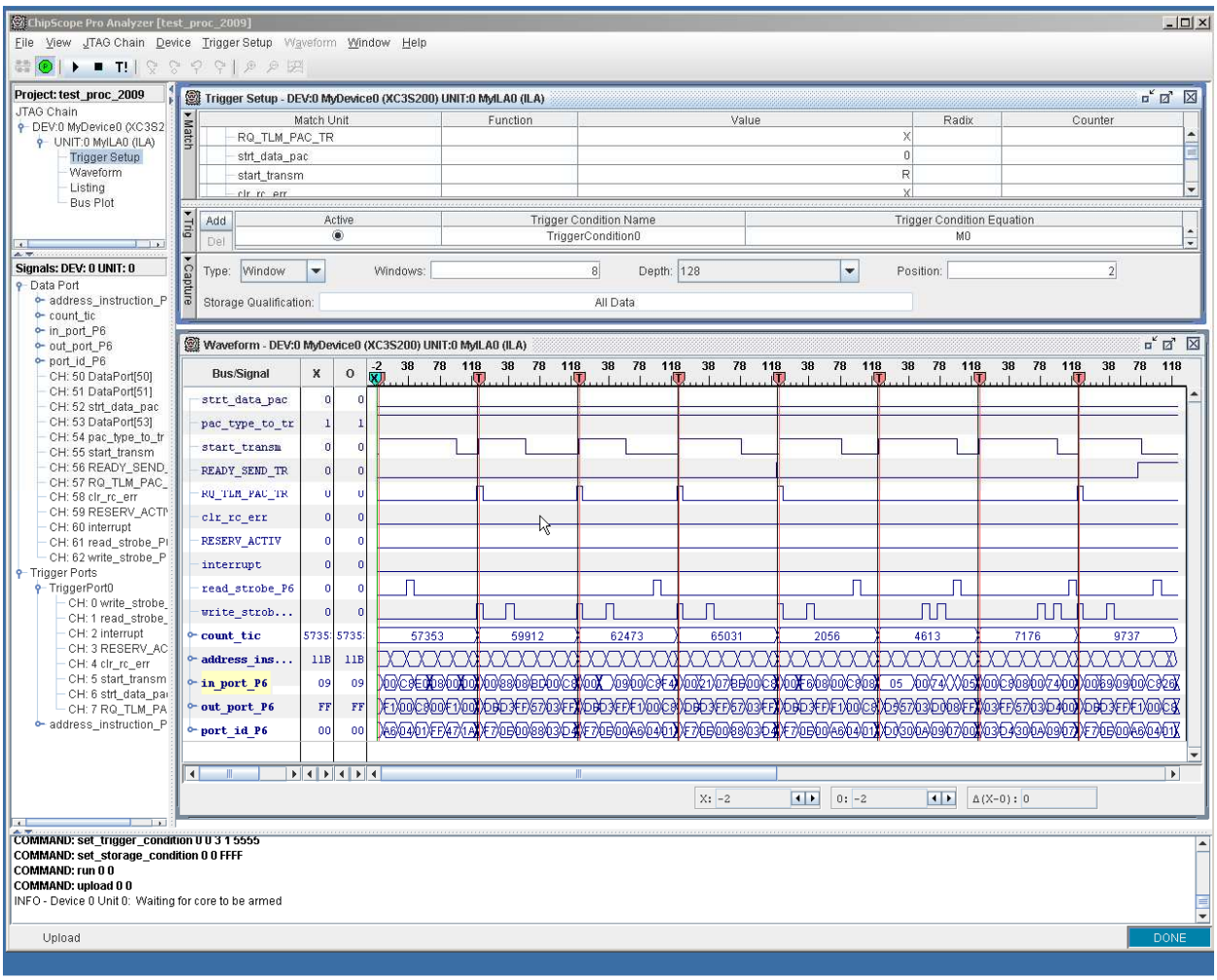

Рисунок 4.7. Фрагмент захвата передачи последовательности при Lp = 64 байт, IFG = 64 байт, ИТП = 204640 мкс

Рассмотрим еще несколько фрагментов захвата передачи той же последовательности из 8 телеметрических пакетов. Ниже представлены такие фрагменты, когда:

- Lp = 512 байт, IFG = 512 байт (Рисунок 4.8);
- Lp = 1518 байт, IFG = 13 байт (Рисунок 4.9);
- Lp = 64 байт, IFG = 16834 байт (Рисунок 4.10).

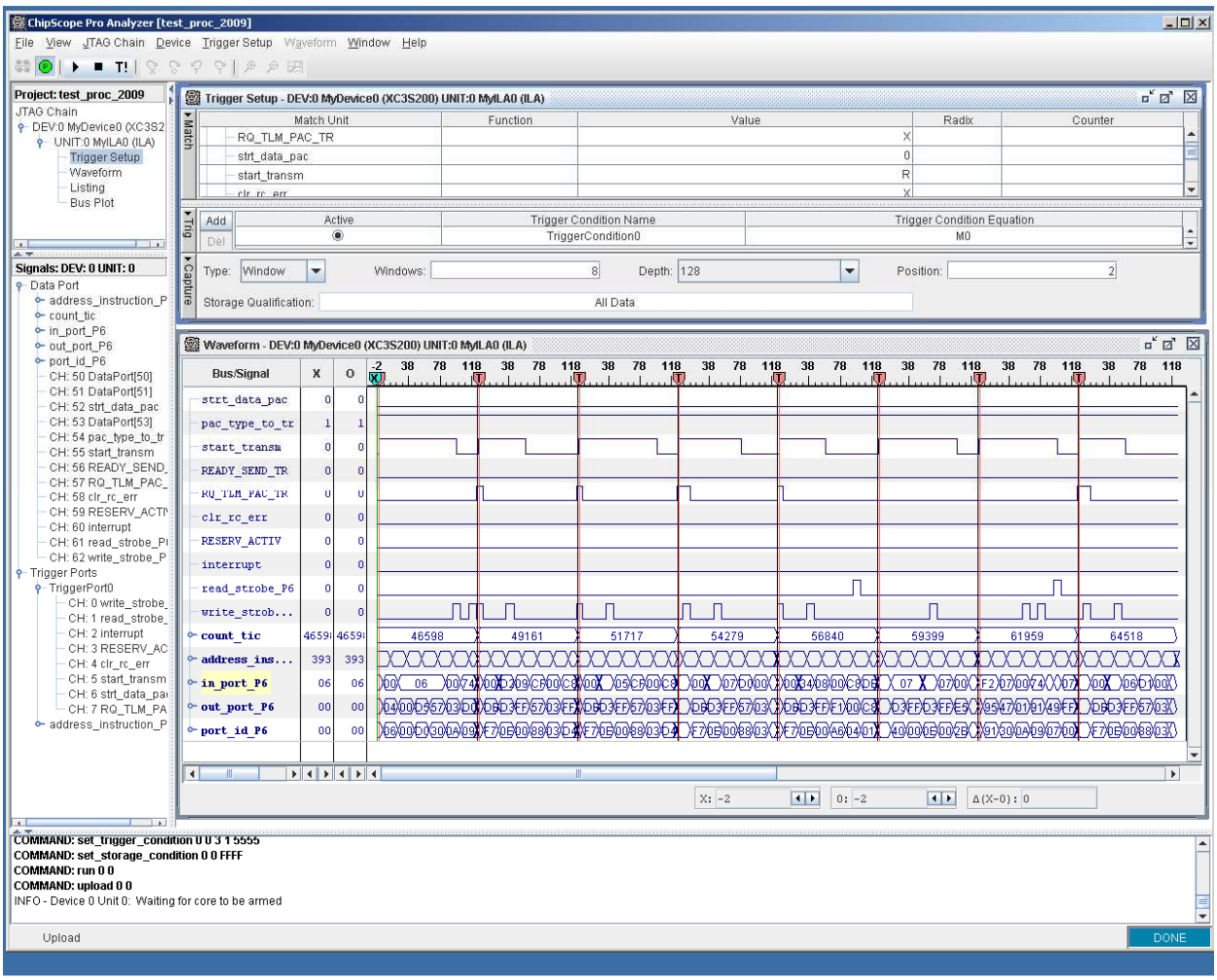

Рисунок 4.8. Фрагмент захвата передачи последовательности при Lp = 512 байт, IFG = 512 байт, ИТП = 204960 мкс

Длина интервала между телеметрическими пакетами составляет величину 204960 мкс. Как и в предыдущих случаях, величина данного интервала находится в пределах 0,205 с.

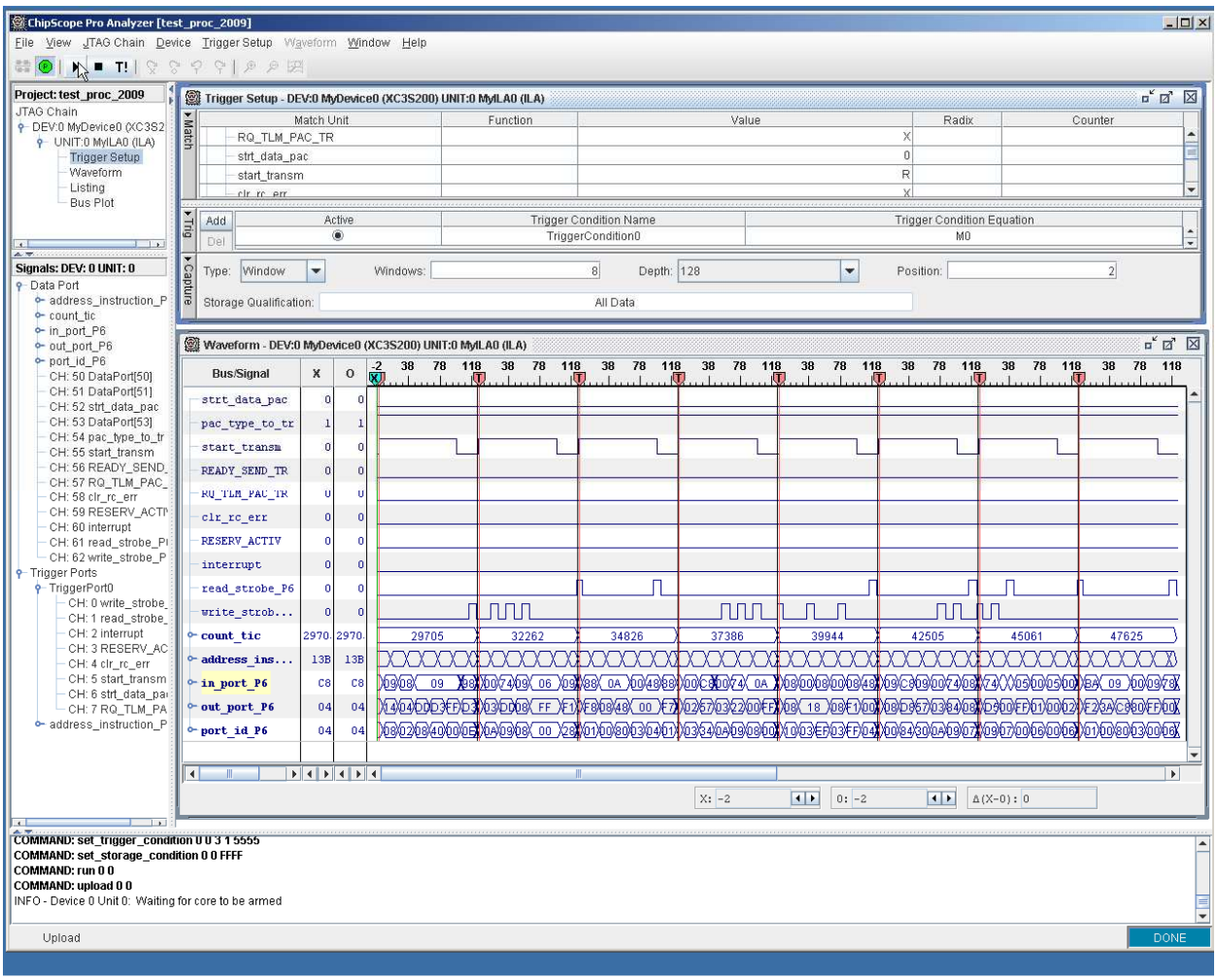

Рисунок 4.9. Фрагмент захвата передачи последовательности при Lp = 1518 байт, IFG = 13 байт, ИТП = 204960 мкс

Длина интервала между телеметрическими пакетами составляет величину 204960 мкс. Как и в предыдущих случаях, величина данного интервал находится в пределах 0,205 с.

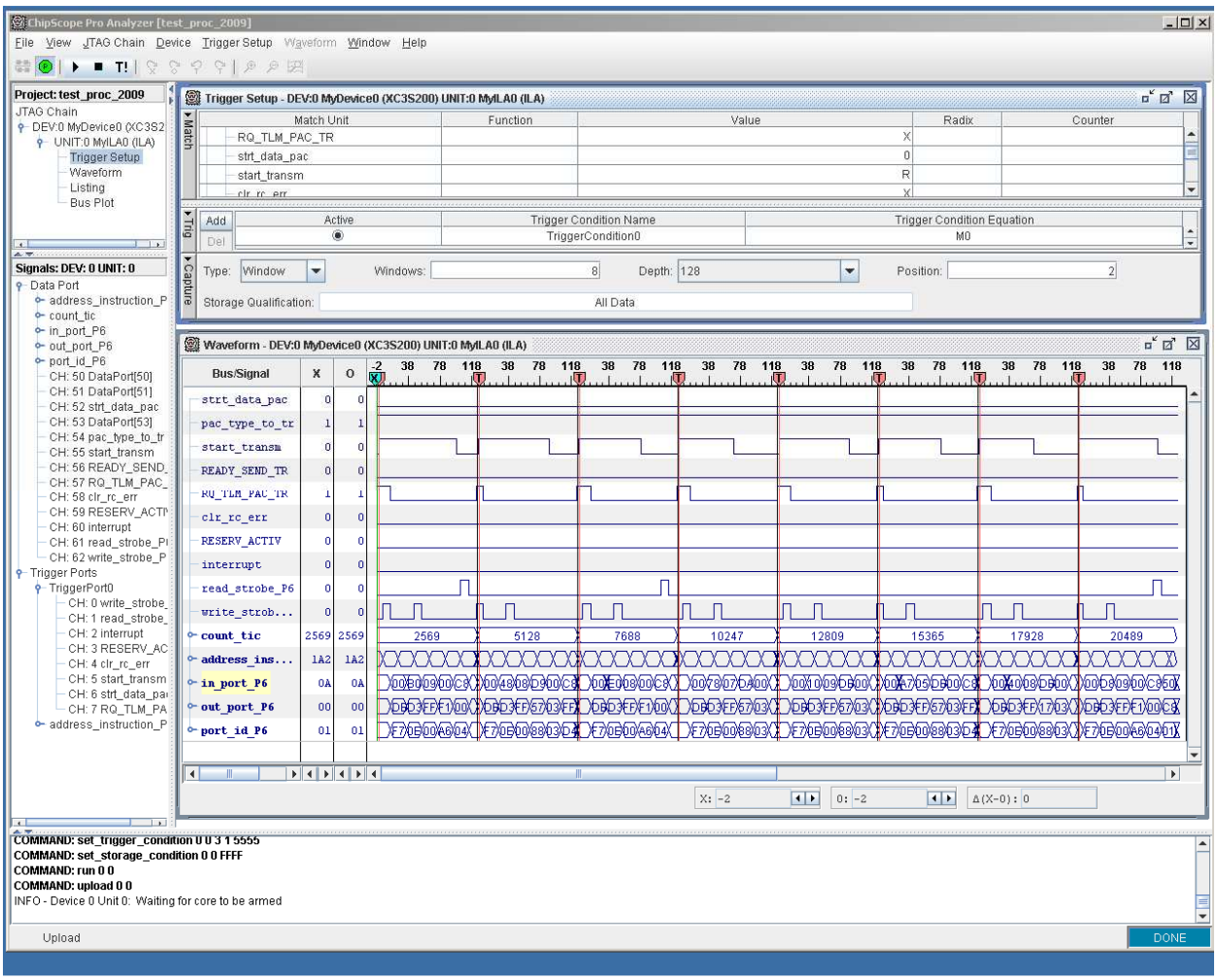

Рисунок 4.10. Фрагмент захвата передачи последовательности при Lp = 64 байт, IFG = 16384 байт, ИТП = 204960 мкс

Из анализа приведенных выше рисунков с фрагментами захвата передачи последовательности пакетов можно сделать определенный вывод. Количество передаваемых телеметрических пакетов не зависит от трафика и определяется временем подготовки телеметрического пакета, которое составляет величину порядка 0,2 с. С таким интервалом времени и происходит оценка качества приема сигнала оптического или радио каналов. Минимальное время оценки качества линии связи может быть установлено на уровне не менее 0,5 с.

4.2 Проведение выбора оптимальных параметров переключения из соотношения сигнал/шум, изменения скорости передачи информации и т.д.

Выбор оптимальных параметров для автоматического переключения режимов работы гибридного канала связи позволит в значительной степени повысить производительность, а также уровень надежности и доступности канала.

В качестве параметров оценки могут выступать следующие количественные и качественные показатели работоспособности канала:

- отношение сигнал/шум;
- скорость передачи информации;
- процентное соотношение продолжительности работы основного и резервного каналов;
- частота приема/передачи ошибочных бит информации BER (Bit Error Rate).

Рассмотрим более подробно влияние указанных выше показателей на работоспособность канала.

Как уже отмечалось ранее, наиболее эффективным решением резервирования основного канала АОЛС является установка параллельной резервной радиолинии. В качестве такой линии может быть предложено два варианта. Первый вариант – это использование канала широкополосного доступа Wi-Fi стандарта IEEE 802.11 a/b/g/n, работающего в диапазонах частот 2,4 ГГц или 5,8 ГГц. В качестве второго варианта может быть предложено использование систем миллиметрового диапазона волн 60 – 70 ГГц (MMW).

Следует обратить внимание, что существующее сегодня оборудование АОЛС позволяет осуществлять прием/передачу информации со скоростью от 100 Мбит/с до 1000 Мбит/с (Full Duplex), а вновь разрабатываемое – свыше 1250 Мбит/с.

Эффективная скорость передачи информации для оборудования Wi-Fi, используемого в качестве резервных линий АОЛС, уже сегодня позволяет осуществлять пропуск трафика со скоростью до 300 Мбит/с, хотя это и ниже скорости каналов АОЛС. Поэтому целевой функцией при построении гибридного канала типа АОЛС/Wi-Fi является уменьшение времени работы радиоканала, что определяется уже качеством оборудования АОЛС и длиной соединения.

Относительно радиоканалов, работающих в диапазоне миллиметровых волн, необходимо отметить, что уже сегодня существует оборудование, способное осуществлять пропуск трафика со скоростью до 1000 Мбит/с, а перспективные разработки позволят увеличить скорость передачи информации до более высоких величин (1250 Мбит/с и выше).

Если относительно гибридного канала на основе АОЛС и Wi-Fi можно однозначно сделать вывод об иерархии первого над вторым ввиду более высокой скорости

приема/передачи информации и низкой цены оборудования Wi-Fi, то в случае совместного использования АОЛС и радиоканала MMW не все так однозначно. В этом случае довольно трудно отдать явный приоритет одному из каналов.

Следует отметить, что при использовании радиолинии MMW и АОЛС можно достичь очень высокой устойчивости такого беспроводного канала к погоде. Объяснение высокому качеству канала можно найти в следующем. Устойчивость радиолиний миллиметрового диапазона зависит, в основном, от дождливой погоды (поскольку размер капель дождя сопоставим с длиной волны), в то время как на оптическую линию сильное влияние оказывает наличие тумана. Следовательно, единственными погодными условиями, которые могут существенно повлиять на работоспособность гибридной линии АОЛС/MMW будет сочетание ливня с сильным туманом. Однако, на практике таких условий быть не может, так как начавшийся дождь абсорбирует частицы тумана и таким образом туман рассеивается.

Особой отличительной чертой резервирования атмосферной оптики с помощью радиоканала в диапазоне миллиметровых волн является высокая вероятность работы радио даже при очень сильном дожде. Это связано с тем, что каналы АОЛС предназначены для связи между объектами на относительно коротких дистанциях (обычно менее 1км), а радиоканалы спроектированы на дистанции до 20 км. Таким образом, в реальности даже при самом сильном ливне, который только может случиться на нашей планете, радиоканал сможет функционировать с хорошими показателями производительности на таких коротких расстояниях (в пределах 1 – 1,5 км). Необходимым условием для этого будет являться лишь правильный выбор диаметра полотна антенны и ее юстировка.

Доказательством такого заключения является бюллетень FCC №70 "Rain Attenuation". Согласно приведенным там данным и графикам, наибольшее затухание для диапазона частот 40 - 100 ГГц в условиях дождливой погоды находится в пределах 50 dB/км. И это при том, что для АОЛС линий наибольшее затухание в условиях густого тумана характеризуется цифрами порядка 350 dB/км. Для образного сравнения (что такое величина 350dB/км) необходимо представить себе бетонную стену.

Производительность для указанных каналов имеет примерно одинаковую величину (в пределах 100 – 1000 Мбит/с, а в перспективе до10 Гбит/с), что позволяет реализовать полностью сбалансированные каналы без падения скорости передачи. Однако цена оборудования диапазона MMW сопоставима с АОЛС оборудованием, а довольно часто и превышает его на 60 – 80 % и даже 100 %.

Исходя из этих экономических соображений, для пропуска трафика целесообразно было бы использовать параллельно оба канала передачи информации. В случае же

неисправности одного из каналов, осуществлять перенаправление трафика в один действующий канал. Правда, в этом случае возникают вопросы о способах разделения потоков информации, их приоритетности. Однако решение этих вопросов не является предметом исследования в данной работе.

Нами будет рассмотрен только вариант гибридного канала, когда в целях пропуска трафика используется только один из каналов, а второй находится в резерве. Автоматическое переключение с основного канала передачи (АОЛС) на резервный и возврат к исходному режиму (основной канал) может осуществляться с помощью специально разработанного контроллера или сетевого мультиплексора.

Следует также выделить такие понятия как «холодное резервирование» и «горячее резервирование» канала АОЛС.

В первом случае оборудование резервного радиоканала находится в отключенном состоянии (отсутствует подача питания на устройство) и нет радиоизлучения. Подача питания и соответственно включение резервного канала происходит по команде от устройства основного канала. В этом случае необходимо некоторое время для достижения резервным каналом устойчивой работоспособности с максимальной производительностью. Это время входит в период недоступности канала. При использовании Wi-Fi оборудования в качестве резервного канала для «холодного резервирования» АОЛС целесообразно применять специальный метод плавного снижения скорости канала АОЛС для перехода на меньшую скорость передачи резервного радиоканала. Кроме того, необходимо использовать механизм приоретизации трафика.

Ниже (Рисунок 4.11) представлена диаграмма работы гибридного канала АОЛС/Wi-Fi, который обеспечивает 100% надежность соединения при дальности в несколько километров.

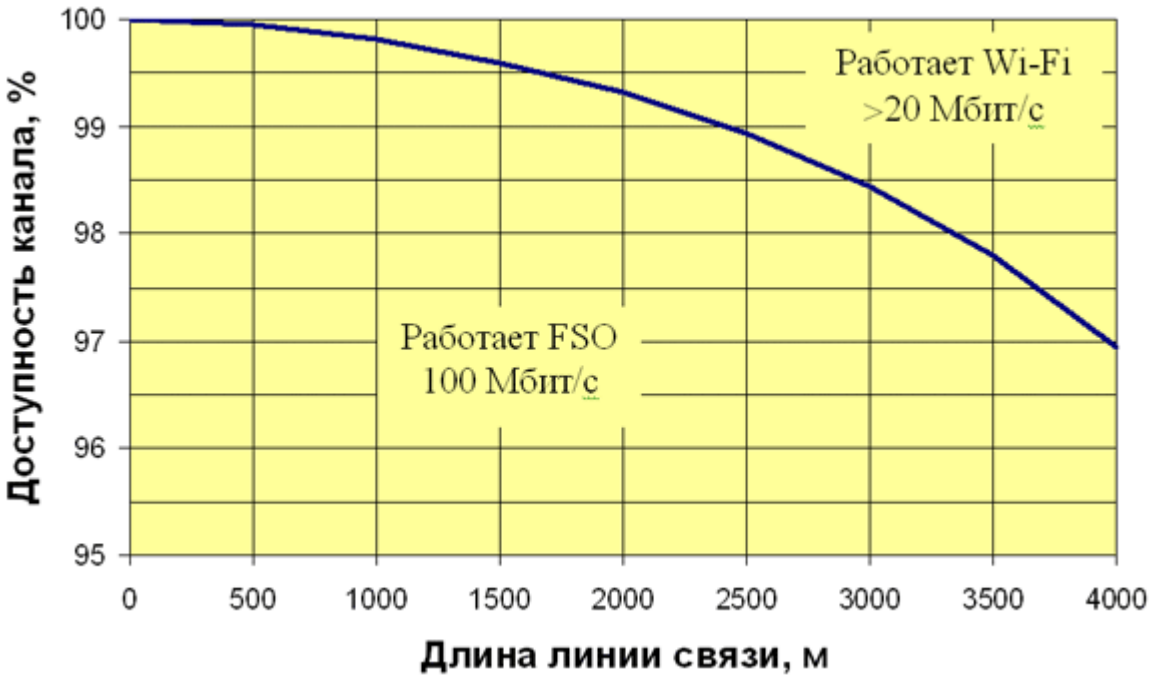

Рисунок 4.11. Диаграмма работы гибридного канала АОЛС/Wi-Fi

При увеличении длины соединения просто растет время работы радиооборудования. Но даже на трассах 4 километра среднее время работы Wi-Fi не превышает 3%. Причем, в большинстве случаев эти проценты приходятся на ночные и утренние часы, наименее загруженные трафиком. Все остальное время оборудование Wi-Fi автоматически переводится в режим "холодного резервирования" и не загружает эфир своим излучением. При этом надежность канала связи составляет 99,99%.

Термин «горячее резервирование» основного канала АОЛС подразумевает, что резервный канал постоянно находится в рабочем режиме (осуществляется подача питания к устройству). В случае нарушений в работе основного канала АОЛС автоматически происходит перенаправление трафика в резервный канал. Обычно такое переключение осуществляется на основе выбора канала по минимуму ошибок в переданных пакетах информации.

В состав оборудования канала АОЛС входят аппаратно-программные средства, которые обеспечивают надежную полнодуплексную передачу трафика по стандарту Fast Ethernet, а также реализуют дополнительные служебные функции:

1) Интегрированный служебный канал между терминалами линии. Данные служебного канала передаются вне полосы основного сигнала и не загружают информационную магистраль;

2) Механизм активной сигнализации через локальный сетевой интерфейс о состоянии оптического и кабельных соединений – функция ALLF. В отличие от обычно используемого варианта LLF, при восстановлении физического соединения автоматически восстанавливается и сетевое соединение без перезагрузки оборудования;

3) Встроенный измеритель качества оптического канала. Используя данные служебного канала, производится постоянное автоматическое измерение ошибок в оптическом канале с частотой 8000 раз в секунду;

4) Широкие сервисные возможности. Программная установка шлейфов, измерение и расчет ошибок, управление параметрами сетевых соединений, встроенная память событий на 1 сутки, сигнализация.

Функция измерения качества оптического канала посредством подсчета величины ошибок переданных пакетов информации позволяет реализовать алгоритм переключения каналов гибридной линии связи, используя расчет коэффициента битовых ошибок BER (отношение количества ошибочных бит к их общему переданному числу). Данный алгоритм и был положен в основу при разработке электронной схемы интерфейсной платы гибридной линии связи.

4.3 Проведение выбора элементной базы. Разработка электронной схемы интерфейсной платы

С технологической точки зрения для создания интерфейсной платы идеальным следует считать разработку специализированной интегральной схемы для решения конкретной задачи ASIC (Application-specific integrated circuit), имеющей необходимые выводы интерфейса, подключенные к внешним портам с минимальной ценой производства. В отличие от интегральных схем общего назначения, специализированные интегральные схемы применяются в конкретном устройстве и выполняют строго ограниченные функции характерные только данному устройству, за счёт этого, выполнение функций происходит быстрее и, в конечном счёте, дешевле.

Однако, освоение ASIC связано со значительными первичными затратами и может быть оправданным при значительном объеме партии продукции. К другим недостаткам использования ASIC можно отнести:

- сложность и длительность производственного цикла внесения изменений в архитектуру;
- узкий круг применения, обусловленный жестко предопределенным набором функций;
- относительная сложность совмещения различных технологий.

Другой подход для решения поставленной задачи основан на использовании набора завершенных устройств ПЛИС (Программируемая Логическая Интегральная Схема) или в английском варианте PLD (Programmable Logic Device). В отличие от обычных цифровых микросхем, логика работы ПЛИС не определяется при изготовлении, а задаётся посредством программирования (проектирования). Для программирования используются программаторы и отладочные среды, позволяющие задать желаемую структуру цифрового устройства в виде принципиальной электрической схемы или программы на специальных языках описания аппаратуры (Verilog, VHDL, AHDL и др.).

Некоторые производители ПЛИС предлагают программные процессоры для своих устройств, которые могут быть модифицированы под конкретную задачу, а затем встроены в ПЛИС. Тем самым обеспечивается уменьшение места на печатной плате и упрощение проектирования самой ПЛИС, за счёт быстродействия.

Ведущими мировыми производителями ПЛИС являются компании:

- Atmel;
- Altera;
- Lattice Semiconductor;
- Xilinx;
- Actel.

Основные отличия устройств ПЛИС различных производителей это:

- архитектура построения внутренних программируемых комбинационных схем;
- способ загрузки программирования ПЛИС;
- емкость логических элементов;
- число эквивалентных вентилей;
- технология изготовления кристаллов;
- различные типы корпусов ПЛИС.

Указанные выше компании осуществляют производство двух типов ПЛИС:

1) CPLD (Complex Programmable Logic Device – сложные программируемые логические устройства). Они содержат относительно крупные программируемые логические блоки — макроячейки (macrocells), соединённые с внешними выводами и внутренними шинами. Функциональность CPLD кодируется в энергонезависимой памяти, поэтому нет необходимости их перепрограммировать при включении. Может применяться для расширения числа входов/выходов рядом с большими кристаллами, или для предобработки сигналов (например, контроллер COM-порта, USB, VGA).

2) FPGA (Field - Programmable Gate Array – программируемая пользователем вентильная матрица). Они содержат блоки умножения-суммирования, которые широко

применяются при обработке сигналов, а также логические элементы (как правило, на базе таблиц перекодировки - таблиц истинности) и их блоки коммутации. FPGA имеют больше логических элементов и более гибкую архитектуру, чем CPLD. Программа для FPGA хранится в распределённой памяти, которая может быть выполнена как на основе энергозависимых ячеек статического ОЗУ (в этом случае программа не сохраняется при исчезновении электропитания микросхемы), так и на основе энергонезависимых ячеек Flash-памяти или перемычек antifuse (в этих случаях программа сохраняется при исчезновении электропитания). Если программа хранится в энергозависимой памяти, то при каждом включении питания микросхемы необходимо заново конфигурировать её при помощи начального загрузчика, который может быть встроен и в саму FPGA. Альтернативой ПЛИС FPGA являются более медленные цифровые процессоры обработки сигналов. FPGA применяются также и как ускорители универсальных процессоров в суперкомпьютерах.

Разработку интерфейсной платы целесообразно выполнить на основе существующих и промышленно выпускаемых устройств ПЛИС типа FPGA. При этом специальные функции выполняются в виде конечных автоматов на основе FPGA. Кроме того ПЛИС также исполняет роль коммутационной матрицы, осуществляющей логически гибкие кросс функции между устройствами.

Проведенный анализ ПЛИС, выпускаемых мировыми производителями, показал, что наиболее приемлемым является использование FPGA фирмы Xilinx.

ПЛИС типа FPGA фирмы Xilinx выполнены по SRAM К-МОП технологии. Характеризуются высокой гибкостью структуры и изобилием на кристалле триггеров. При этом логика реализуется посредством так называемых LUT - таблиц (Look Up Table) Xilinx, а внутренние межсоединения - посредством разветвлённой иерархии металлических линий, коммутируемых специальными быстродействующими транзисторами.

На Рисунке 4.12 представлена блок схема архитектуры ПЛИС FPGA

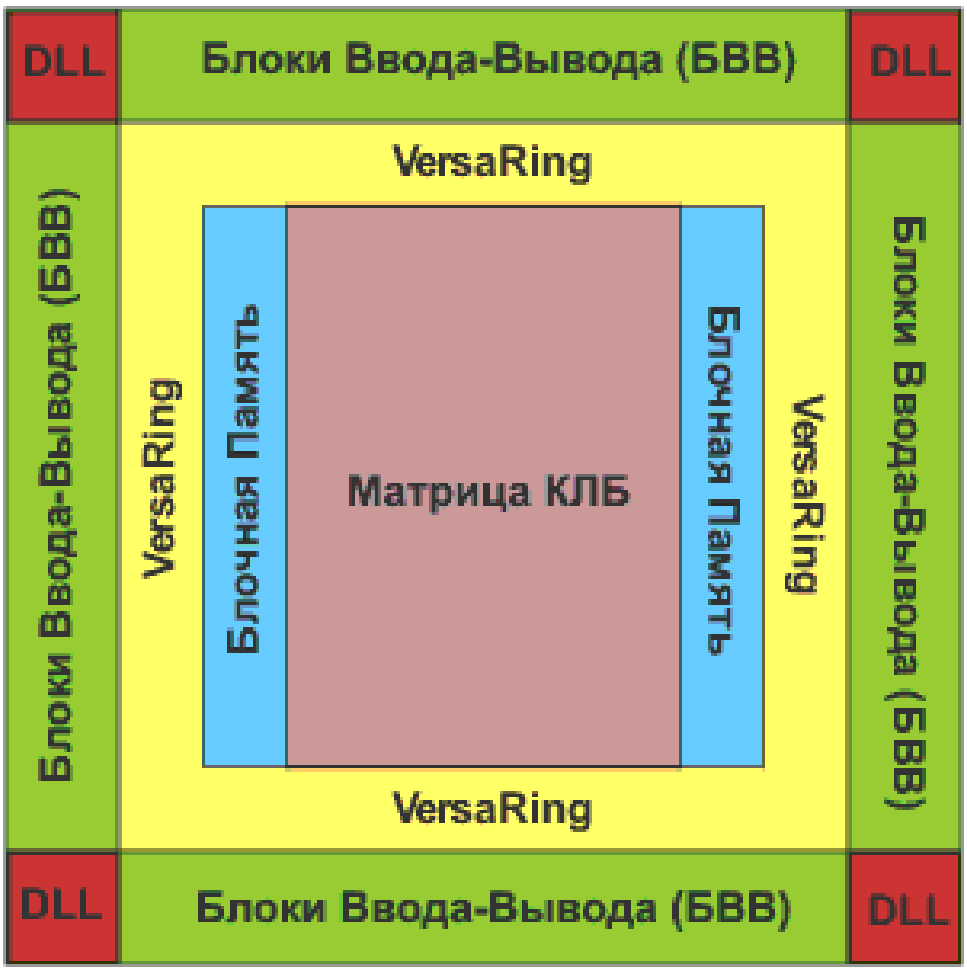

Рисунок 4.12. Блок схема архитектуры ПЛИС FPGA

Отличительными системными особенностями являются:

- внутренние буфера с возможностью переключения в высокоомное состояние и тем самым позволяющие организовать системные двунаправленные шины
- индивидуальный контроль высокоомного состояния и времени нарастания фронта выходного сигнала по каждому внешнему выводу
- наличие общего сброса/установки всех триггеров ПЛИС
- множество глобальных линий с низкими задержками распространения сигнала
- наличие внутреннего распределённого ОЗУ Xilinx, реализующегося посредством тех же LUT - таблиц
- наличие внутреннего блочного ОЗУ, один блок имеет ёмкость 4 кбит или 18 кбит в зависимости от семейства
- наличие встроенных блоков умножителей 18x18
- наличие встроенных блоков DSP-48

- наличие встроенных блоков процессоров PowerPC-405
- наличие высокоскоростных последовательных приемо-передатчиков - MGT со скоростью передачи данных 11 ГБит/с

Конфигурационная последовательность (bitstream) может быть загружена в ПЛИС непосредственно в системе и перегружена неограниченное число раз. Инициализация ПЛИС производится автоматически (из загрузочного ПЗУ Xilinx) при подаче напряжения питания или принудительно по специальному сигналу. В зависимости от ёмкости ПЛИС процесс инициализации занимает от 20 до 900 мс, в течение которых выводы ПЛИС находятся в высокоомном состоянии (подтянуты к логической единице).

Статическое потребление энергии достаточно мало и для некоторых серий составляет единицы микроватт. Динамическое же потребление пропорционально возрастает с частотой функционирования проекта и зависит от степени заполнения кристалла, характера логической структуры проекта на кристалле, параметров режима внешних выводов ПЛИС и т. д.

Для каждого отдельно взятого семейства ПЛИС Xilinx существует преемственность кристаллов по типу корпуса и, соответственно, цоколёвке, то есть в одни и те же корпуса упаковываются ПЛИС различного логического объёма, что позволяет разработчику, задавшись на этапе проектирования печатной платы определённым типом корпуса, в дальнейшем устанавливать ПЛИС наиболее подходящего размера.

В настоящее время компания Xilinx производи**т следующие серии и семейства ПЛИС типа FPGA:**

- Spartan-6;
- Extended Spartan-3A;
- Spartan-3A DSP;
- Spartan-3AN;
- Spartan-3A;
- Spartan-3E;
- Spartan-3;
- Virtex-6;
- Virtex-5;
- Virtex-5Q;
- Virtex-5QV;
- Virtex-4;
- Virtex-4Q;
- Virtex-4QV;

- Virtex-II Pro;
- Virtex-II;
- Virtex-E EM;
- Virtex-E;
- Virtex.

Все представленные серии и модификации FPGA компании Xilinx удовлетворяют необходимым условиям и могут быть использованы в качестве базовой ПЛИС при разработке электронной схемы интерфейсной платы гибридной линии связи.

Ниже (Таблица 4.1) приведены некоторые сравнительные характеристики различных серий ПЛИС из разряда FPGA фирмы Xilinx.

Таблица 4.1. Сравнительные характеристики ПЛИС FPGA фирмы Xilinx

Свойство	**Virtex-6**	**Virtex-6**	**Spartan-6**	**Spartan-3A**
Вентилей	до 760 000	до 330 000	до 150 000	до 53 000
Пользовательские I/O	до 1200	до 1200	до 576	до 519
Стандартные I/O	больше 40	больше 40	больше 40	больше 20
Технология синхронизации	PLL	DCM+PLL	DCM+PLL	DCM
Встроенная RAM	до 38 Mbits	до 18 Mbits	до 4.8 Mbits	до 1.8 Mbits
PCI Express® Technology	Gen 1, x8, hard; Gen 2, x8, hard	Gen 1, x8, hard; Gen 2, x8, hard	Gen 1, x1, hard	нет
MicroBlaze™ Soft Processor	да	да	да	да
Multi-Gigabit High Speed Serial	6.5 Gbps, beyond 11 Gbps	3.75 Gbps, 6.5 Gbps	3.125 Gbps	Нет

Однако выбор был сделан в пользу серии Spartan-3. Использование FPGA данной серии является своеобразным компромиссом, который учитывает возможности кристалла, цену конечного изделия, используемую технологию, а также наличие средств проектирования и поддержки. Такой выбор позволяет решить поставленную задачу с минимальными ценовыми издержками, а также без серьезных изменений мигрировать на более сложные и производительные платформы Spartan-6, Virtex-4 или Virtex-6 в случае усложнений исходных требований.

Ниже (Таблица 4.2) представлены основные технические характеристики ПЛИС всех семейств серии Spartan.

Таблица 4.2. Основные характеристики ПЛИС всех семейств серии Spartan

Семейство	Встроенная Flash	Блоки Ввода-вывода	Логические ячейки	Block RAM	Умножители	DCM	Стандарты питания
Spartan – 6	–	498	147 456	4824 Кбит	182 18x18	6 CMT	3.3В - 1.2В
Spartan – 3A DSP	–	519	53 712	2268 Кбит	126 18x18	8	3.3В - 1.2В
Spartan – 3AN	16Мбит	502	25 344	576 Кбит	32 18x18	8	3.3В - 1.2В
Spartan – 3A	–	502	25 344	576 Кбит	32 18x18	8	3.3В - 1.2В
Spartan – 3E	–	376	33 192	648 Кбит	36 18x18	8	3.3В - 1.2В
Spartan – 3	–	784	74 880	1872 Кбит	104 18x18	4	3.3В - 1.2В
Spartan – IIE	–	514	15 552	288 Кбит	–	4	3.3В - 1.5В
Spartan – II	–	284	5 292	56 Кбит	–	4	3.3В - 1.5В
Spartan – XL	–	224	1 862	–	–	–	3.3В
Spartan	–	224	1 862	–	–	–	5В

Следует отметить, что в данной таблице представлены максимальные значения параметров ПЛИС каждого семейства.

Модуль управления синхронизацией определяется формулой:

DCM (Digital Clock Manager) = DLL (Delay Locked Loops) + DFS (Digital Frequency Synthesizer) + PS (Phase Shifter)

Параметр разрядности CMT определяется формулой:

1 CMT = 2 DCM + 1 PLL

Семейства Spartan-6 и Spartan-3A DSP используют в качестве умножителей блоки DSP48 (блоки умножения с накоплением).

Серия семейства ПЛИС с архитектурой FPGA Spartan™-3 (заводская маркировка XC3) специально разработана для использования в электронных устройствах, рассчитанных на большие тиражи и невысокую стоимость комплектующих.

Основные особенности семейства Spartan-3:

- революционный технологический процесс: 90 нм SRAM КМОП;
- низкая стоимость, высокая производительность логики, ориентированная на применение в устройствах предназначенных для массового потребителя;
- ёмкость достигает 74 880 логических ячеек;
- системная тактовая частота до 326 МГц;
- 3 раздельных напряжения питания:
  - ядра - 1,2 В;
  - блоков ввода-вывода - от 1,2 до 3,3 В;
  - специальных функций - 2,5 В;
- Технология SelectIO:
  - поддержка 17 сигнальных стандартов ввода-вывода;
  - 6 дифференциальных стандартов передачи сигналов, включая LVDS;
  - передача данных со скоростью 622 Мбит/с по одному выводу входа/выхода;
  - до 784 выводов входа/выхода;
  - размах сигнала от 1,14 до 3,45 В;
  - программируемый импеданс;
  - поддержка передачи данных с удвоенной скоростью (DDR);
- Логические ресурсы:
  - гибкие логические ячейки с регистрами;
  - мультиплексоры для реализации многовходовой функции;
  - логика ускоренного переноса;

- встроенные блоки умножения, каждый блок 18×18 бит;
- совместимость с JTAG IEEE 1149/1532 стандартами;

- Технология SelectRAM:
  - до 1 872 кбит блочной памяти;
  - до 520 кбит общей распределённой памяти;
- Модули управления синхронизацией (DCM):
  - точная подстройка фронтов тактирующих сигналов;
  - умножение, деление частоты;
  - сдвиг фазы с высоким разрешением;
  - защита от электромагнитных помех;
- Полная поддержка в САПР ISE начиная с версии 6.1i.

Ниже (Таблица 4.3) представлены основные характеристики 8 кристаллов ПЛИС типа FPGA Spartan-3 , отличающихся логической ёмкостью. При этом минимальный по ёмкости кристалл содержит 50 тыс. эквивалентных системных вентилей, а максимальный - 5 млн.

Таблица 4.3. Основные характеристики семейства ПЛИС типа FPGA Spartan-3

Наименование ПЛИС	**S50**	**S200**	**S400**	**S1000**	**S1500**	**S2000**	**S4000**	**S5000**
Логические ячейки	1728	4320	8064	17280	29952	46080	62208	74880
Системные вентили	50K	200K	400K	1M	1,5M	2M	4M	5M
Матрица КЛБ	16x12	24x20	32x28	48x40	64x52	80x64	96x72	104x80
Блочная ОЗУ, кбит	72	216	288	432	576	720	1728	1872
Умножители	4	12	16	24	32	40	96	104
DCM	2	4	4	4	4	4	4	4
Блоки ввода-вывода, макс.	124	173	264	391	487	585	712	784

Блок схема архитектуры интерфейсной платы при выбранном стиле проекта изображена на Рисунке 4.13.

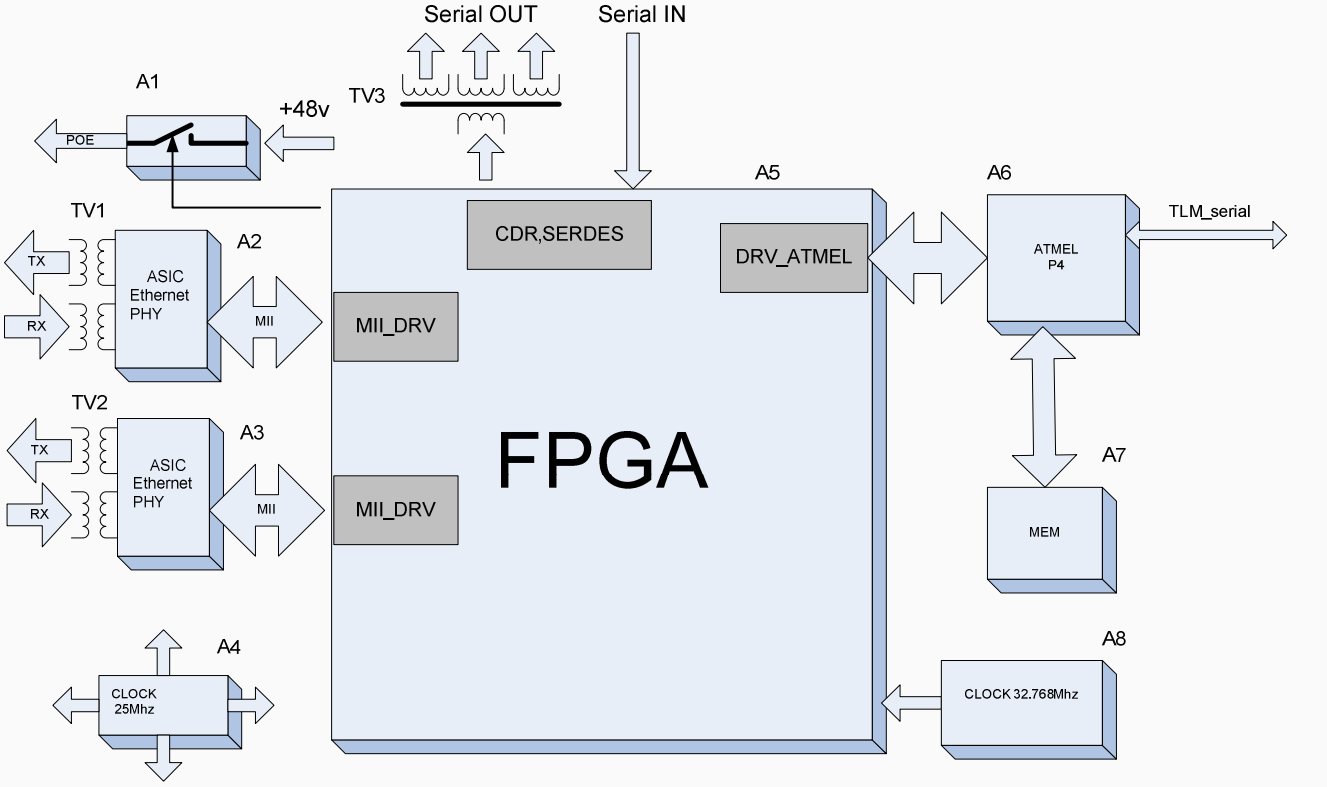

Рисунок 4.13. Блок схема архитектуры интерфейсной платы

Данная схема включает в себя восемь активных функциональных устройств, выполненных на базе интегральных микросхем, а также три пассивных устройства согласования.

Устройство А1 исполняет роль коммутатора, осуществляющего подачу питания +48В для запуска устройства резервного канала связи (радиоканал). Питание резервного канала осуществляется по кабелю «витая пара» с использованием технологии PoE (Power over Ethernet).

Устройства А2 и А3 являются специализированными интегральными микросхемами ASIC Ethernet PHY. Совместно с трансформаторами TV1 и TV2 данные микросхемы осуществляют согласование физических линий Ethernet соответственно резервного канала связи и канала пользователя с уровнем MII- MEDIA INDEPENDENT INTERFACE по классификации IEEE802.3.

Основой интерфейсной платы является ПЛИС типа FPGA - устройство А5. Данное устройство осуществляет реализацию драйверов MII и обеспечивает полнофункциональное управление потоками данных Ethernet.

Устройство A4 исполняет роль генератора тактовой частоты 25 МГц, необходимой для синхронизации и функционирования устройств A2 и A3 для согласования физических линий ASIC Ethernet PHY.

Трансформатор TV3 осуществляет согласование и разделение входных цепей оптических передатчиков с FPGA.

Устройство A6 является процессором Atmel P4, который необходим для первичной инициализации FPGA. Кроме того устройство A6 обеспечивает обмен телеметрической информацией с ИП ППМ по линии TLM_serial.

Память конфигурации FPGA хранится в упакованном формате в устройстве A7, которое исполняет роль FLASH памяти последовательного доступа.

Источник синхронизации A8 с частотой 32.768 МГц используется для организации приемо-передающего оптического канала.

В указанной архитектуре ПЛИС типа FPGA выступает в роли “черного ящика” и предполагается, что она выполняет задуманные преобразования. Однако, для того чтобы это воплотить в жизнь, необходимо “оснастить” внутренности ПЛИС содержанием.

Технические требования проекта предусматривают передачу данных пользователя со скоростью не менее 100 Мбит/с в виде пакетов (согласно стандарта IEEE802.3). Структура пакета предусматривает наличие преамбулы размером 8 байт и блока данных (размерность от 64 до 1518 байт).

Для сохранения совместимости с уровнем MII структура пакета должна быть неизменной. Как известно, передача данных с учетом среды передачи обычно сопровождается предварительным транспортным кодированием, снижающим влияние среды передачи на достоверность передачи и возможностью интерсимвольной декомпиляции на приеме последовательного потока. Так передача данных Ethernet пакета на физический уровень предварительно сопровождается кодированием (4b/5b,8b/10b), что приводит к необходимости увеличения транспортной скорости до 125 Мбит/с. Проектом предусмотрено наличие дополнительного телеметрического обмена между разнесенными АОЛС в виде обмена блоками кодов размерностью 256 байт. В качестве источника синхронизации передатчика используется четвертая гармоника эталонного кварцевого генератора 32.768 МГц. Таким образом, транспортная скорость оптического канала достигает 131.072 Мбит/с. При сохранении 20% избыточности транспортного кодирования для пакетов Ethernet избыточный трафик 6.072 Мбит/с используется для:

– передачи телеметрических пакетов;
– передачи отличительных признаков типа пакета;

– формирования технологических межпакетных интервалов необходимых для синхронизации CDR асинхронного приемника пакетов.

Таким образом, битовый интервал (UI-Unit-Interval) составит 1/131.072=0.007629 мкс.

Иерархическое содержимое архитектуры FPGA приведено на Рисунке 4.14. Здесь вершину проекта характеризует сущность (entity) AL_FE_TOP_v18. Описание проекта приведено в приложении 1-20 на языке VHDL (Very High Speed Integrated Circuits Hardware Description Language).

Такое описание, достаточно формализованное и однозначное, используемое для синтеза системы имеет самостоятельную ценность, как средство передачи знаний о спроектированной аппаратно реализованной цифровой системе от разработчика к специалисту, ее применяющему.

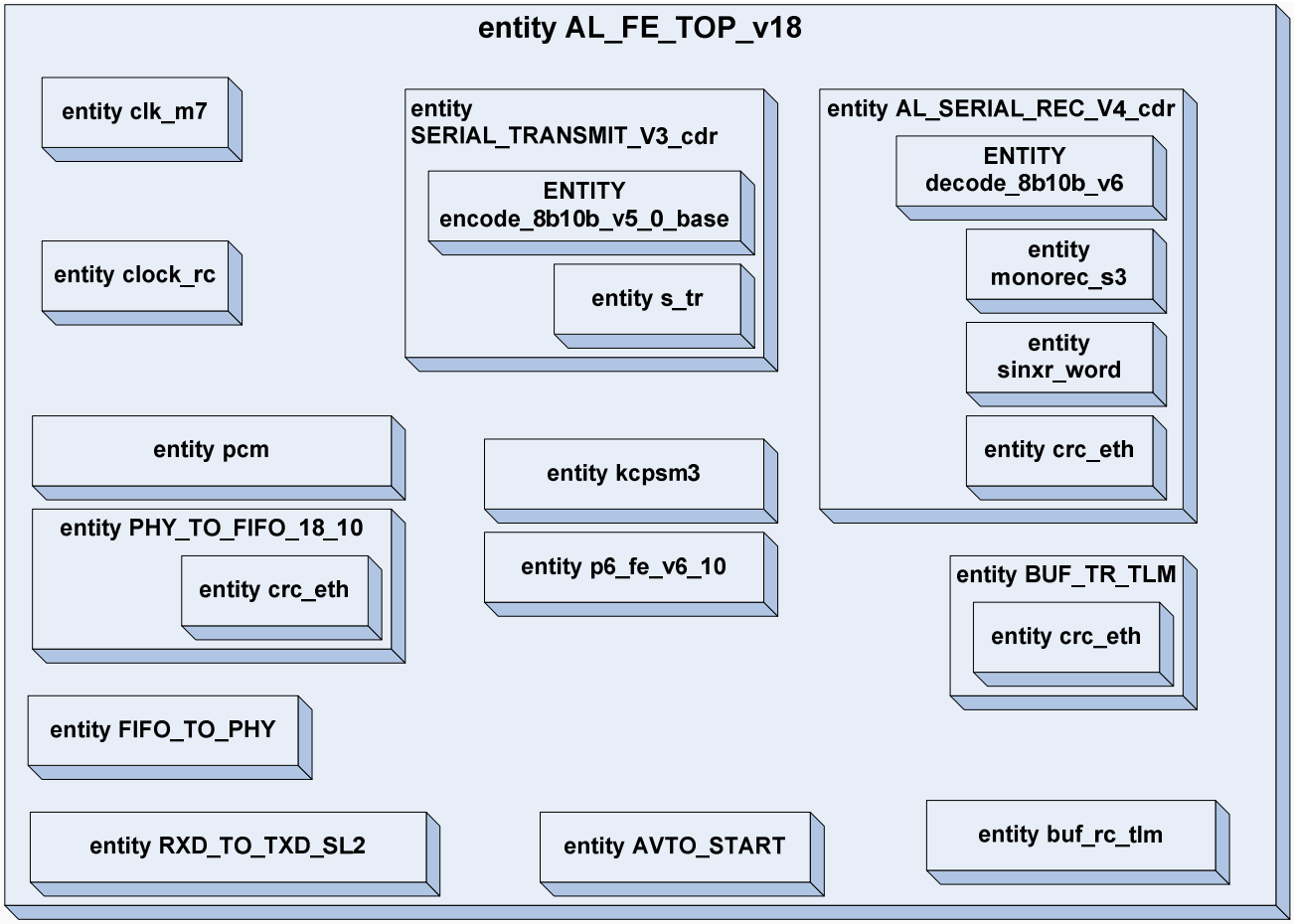

Рисунок 4.14. Иерархическое содержимое архитектуры FPGA

Следует отметить некоторые особенности проекта:

1. При реализации проекта средствами внутренних ресурсов FPGA в состав архитектуры включен восьмиразрядный процессор для выполнения задач управления ресурсами среднего звена.

2. При работе с внешними устройствами ASIC PHY сигналы синхронизации данных по отношению к FPGA являются входными и асинхронны к внутренней частоте. Перенос данных в домен с внутренней синхронизацией осуществляется за счет использования двухпортовых блоков памяти с независимыми портами адресации, синхронизации и управления.

3. Реализация компонента monorec_s3, выполняющего функцию CDR приемника, в физическом пространстве FPGA для достижения приемлемых значений времени распространения критичных сигналов, выполнена с редакцией размещения в ручном режиме.

Электрическая принципиальная схема интерфейсного модуля приведена на Рисунке 4.15.

Подача питания +5V и +45V на интерфейсную плату осуществляется через соединительный разъем XP13 (тип PLS-26).

Для питания интегральных микросхем интерфейсной платы необходимо посредством преобразователей напряжения организовать из первичного источника питания +5V дополнительные значения источников питания. В качестве преобразователей напряжения используются интегральные микросхемы LM1117IMP-ADJ. Данные микросхемы выполняют роль линейного стабилизатора напряжения с высоким током стабилизации (до 800 mA). В зависимости от номиналов навесных пассивных элементов организуются следующие значения источников питания:

- 2,5V (DD4);
- 1,25V (DD5);
- 3,3V (DD6).

Специализированная интегральная схема (ASIC) AM79C874VI (производитель AMD) исполняет роль трансивера для преобразования 10/100BASE-TX Ethernet в 100BASE-FX. Микросхемы DD2 и DD3 осуществляют согласование физических линий Ethernet соответственно канала пользователя и резервного канала связи с уровнем MII- MEDIA INDEPENDENT INTERFACE по классификации IEEE802.3.

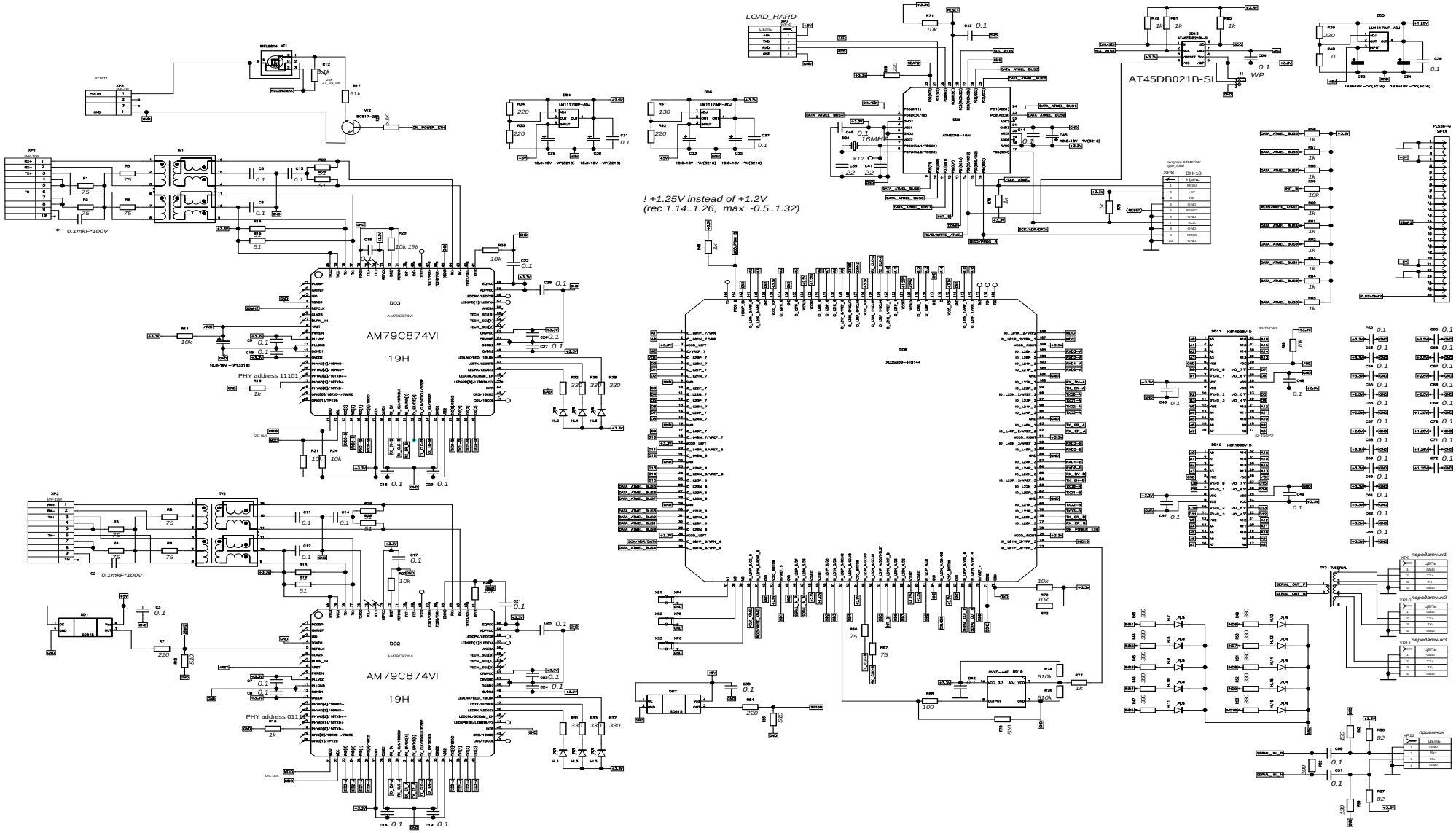

Рисунок 4.15. Электрическая принципиальная схема интерфейсной платы

Блок-схема для ASIC AM779C874 представлена на Рисунке 4.16.

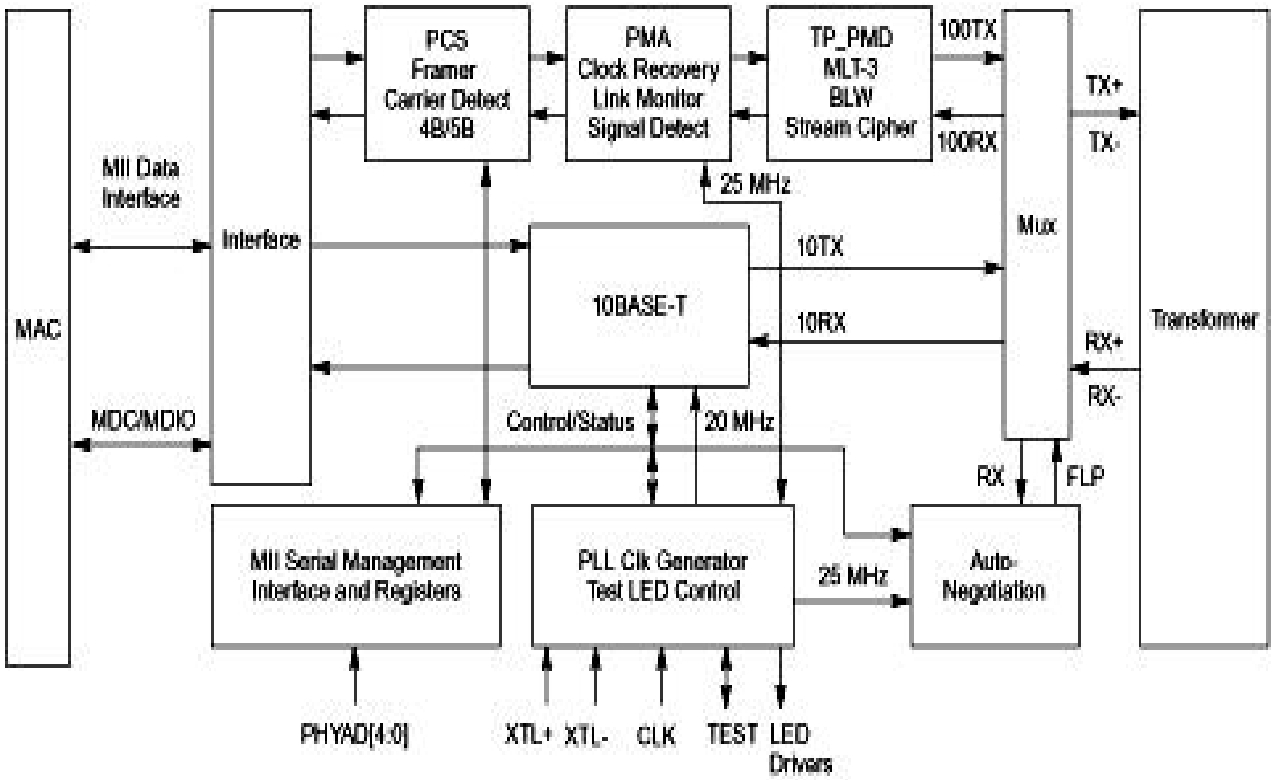

Рисунок 4.16. Блок-схема ASIC AM779C874

Для канала пользователя цепь прохождения сигнала будет: разъем XP2 - согласующий трансформатор TV2 – микросхема DD2.

Для резервного канала связи цепь прохождения сигнала будет: разъем XP1 - согласующий трансформатор TV1 – микросхема DD3.

Для контроля функционирования и наладочных работ каждый из портов оснащен светодиодами HL1 - HL6, которые осуществляют индикацию следующих режимов работы:

- скорость канала (10/100);
- активность режима передачи;
- активность режима приема.

Для синхронизации работы микросхем DD2 и DD3 используется тактовая частота 25.000 MHz, которую вырабатывает микросхема DD1 типа SG615 (производитель Epson). Данная микросхема выполнена по технологии SMD (Surface Mount Tchnology) для поверхностного монтажа печатных плат. Питание микросхемы - +5V.

Микросхема DD8 – это FPGA типа XC3S200-4TQ144 серии Spartan-3 (производитель Xilinx). Ниже (Рисунок 4.17) представлена упрощенная блок-схема входных и выходных цепей (IOB) данной ПЛИС.

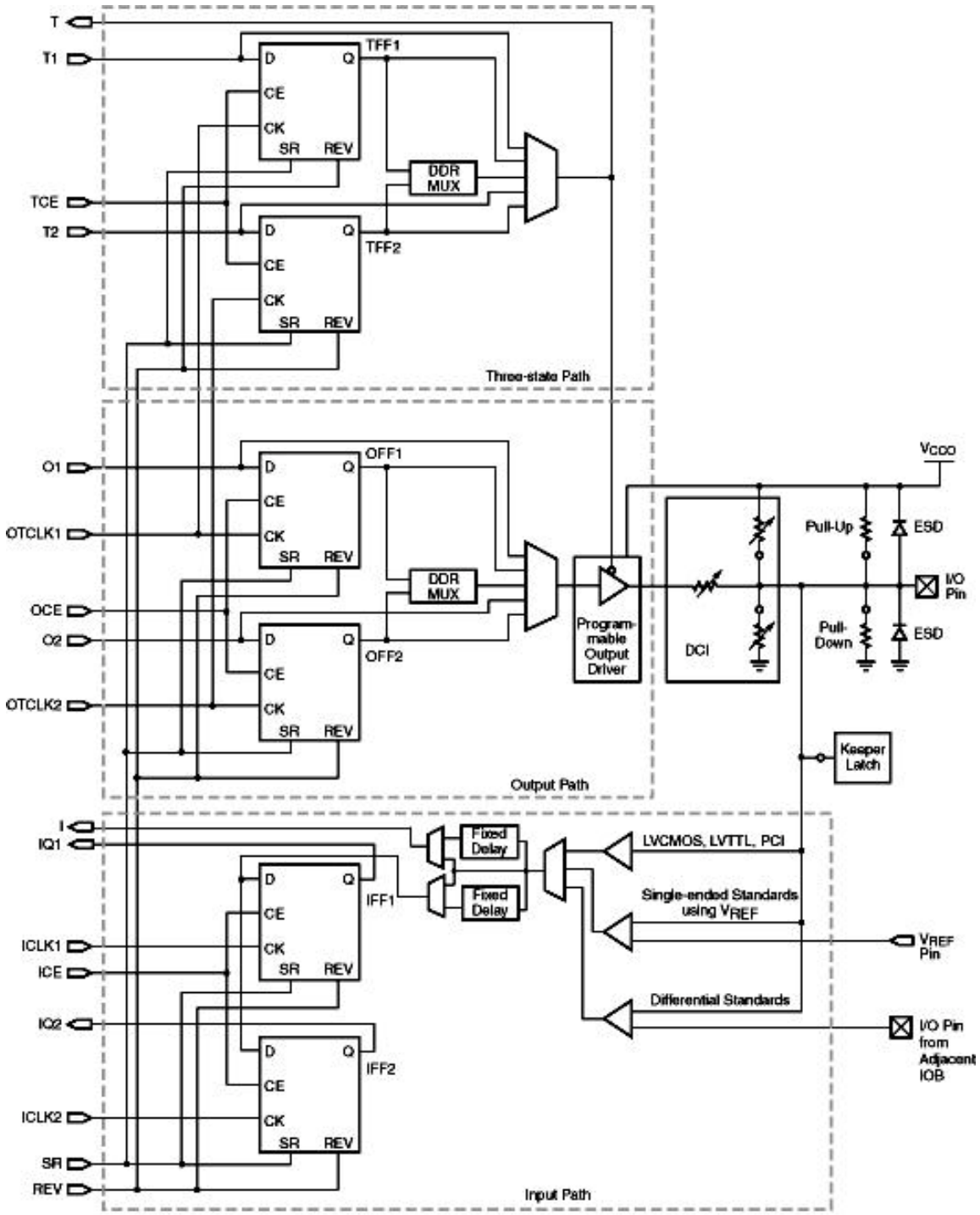

Рисунок 4.17. Блок-схема цепей IOB для FPGA XC3S200-4TQ144

Генератор опорной частоты 32.768 MHz для синхронизации FPGA выполнен на микросхеме DD7 типа SG615 (производитель Epson). Данная микросхема выполнена по технологии SMD (Surface Mount Tchnology) для поверхностного монтажа печатных плат. Питание микросхемы - +5V.

Микросхема DD13 типа AT45DB021B-SI (производитель Atmel) – это flash-память размерностью 2 Mbits (1024 pages x 264 bytes), в состав которой входят также два буфера

памяти SRAM размерностью по 264 bytes каждый. На Рисунке 4.18. представлена блок-схема данного устройства.

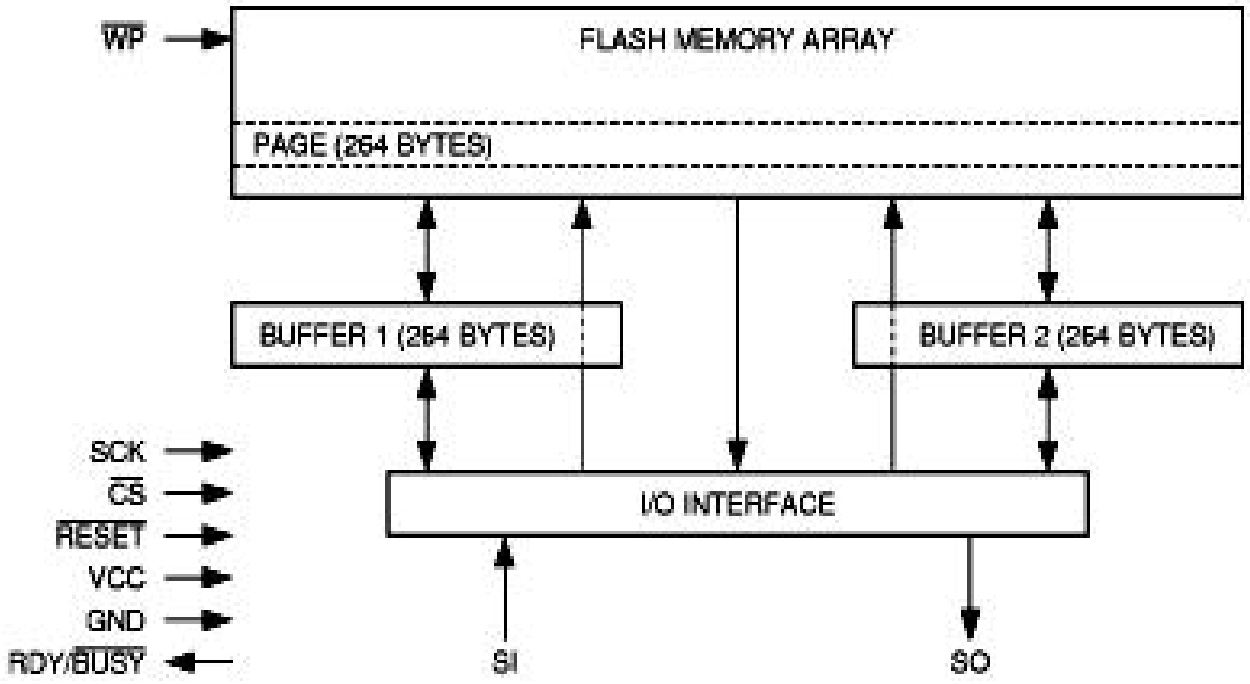

Рисунок 4.18. Блок-схема ИС памяти AT45DB021

Микросхема DD9 – это 8-ми битовый программируемый микроконтроллер типа ATMEGA88-20AI (производитель Atmel). На Рисунке 4.19 представлена блок-схема данного микроконтроллера.

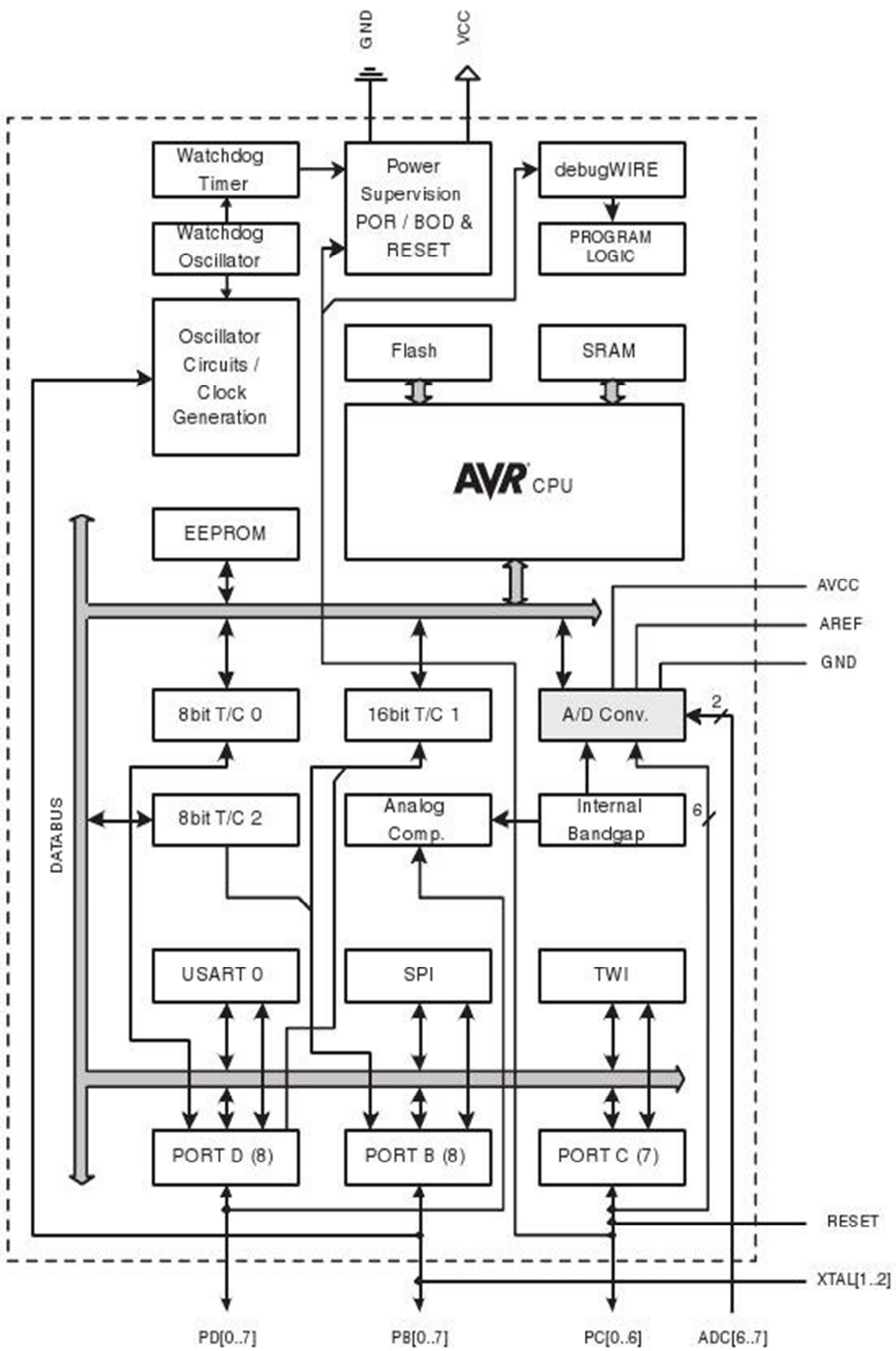

Рисунок 4.19. Блок-схема микроконтроллера ATMEGA88

Микросхемы DD9 и DD13 совместно выполняют функции загрузки и интерфейса телеметрического канала.

Выключатель питания резервного канала выполнен по схеме составного электронного ключа. Сигнал ON_POWER_ETH (логическая «1»), сформированный FPGA DD8, поступает на базу n-p-n транзистора VT2 типа BC817. Происходит открытие транзистора VT2 и на его коллекторе появляется сигнал 0, который попадает на затвор полевого транзистора VT1 типа IRFL9014. Происходит открытие транзистора VT1 и по каналу исток – сток питание +45V подается на контакт 1 POETH разъема XP3. Таким образом, питание +45V подается непосредственно в силовую цепь резервного канала радио для его включения.

Микросхемы ОЗУ (DD11,DD12) и ГУН (DD10) в текущем проекте не используются и не устанавливаются на плате, но могут быть использованы для перспективных модификаций устройства.

Подключение сигнальных цепей передатчика оптического канала выполняется через разъемы XP9 - XP11, приемника через XP12. Для удобства контроля работы устройства дополнительно установлены световые индикаторы HL7 - HL16. Смысловое значение активности индикаторов приведено ниже:

HL7 - безошибочный взаимный обмен локального и удаленного интерфейса;

HL8 - безошибочный прием локального интерфейса;

HL9 - событие успешного приема телеметрического пакета;

HL10 - событие передачи телеметрического пакета;

HL11 - для передачи данных пользователя используется оптический канал;

HL12 - для передачи данных пользователя используется резервный канал;

HL13 - режим LLF включен;

HL14 - в стратегии главный канал – оптический;

HL15 - событие реверса полярности приемного сигнала;

HL16 - событие обнаружения одиночной ошибки по оптическому каналу.

Ниже (Таблица 4.4) приведена спецификация интегральных микросхем (ИС), которые используются в электронной схеме интерфейсной платы гибридного канала.

Таблица 4.4. Спецификация интегральных микросхем интерфейсной платы

Элемент	Наименование	Функция	Производитель
DD1	SG615	Генератор опорной частоты 25.000 MHz	Epson

DD2	AM79C874VI	Трансивер Ethernet	AMD
DD3	AM79C874VI	Трансивер Ethernet	AMD
DD4	LM1117IMP-ADJ	Стабилизатор напряжения 2,5V	National Semiconductor
DD5	LM1117IMP-ADJ	Стабилизатор напряжения 1,25V	National Semiconductor
DD6	LM1117IMP-ADJ	Стабилизатор напряжения 3,3V	National Semiconductor
DD7	SG615	Генератор опорной частоты 32.768 MHz	Epson
DD8	XC3S200-4TQ144	ПЛИС типа FPGA	Xilinx (Spartan™-3)
DD9	ATMEGA88-20AI	Микроконтроллер	Atmel
DD10	GVXO-44F	ГУН	
DD11	K6R1008VID	ОЗУ 128Kx8	
DD12	K6R1008VID	ОЗУ 128Kx8	
DD13	AT45DB021B-SI	Flash 2 Mbits	Atmel

Интерфейсная плата в своем составе содержит анализатор качества оптического соединения, который управляет переключателем входного трафика. В случае потери качества или полного отсутствия связи в основном канале в течение времени превышающем значение 1 секунда, происходит перенаправление трафика на порт резервного радиоканала. Обратное перенаправление трафика в основной канал происходит при безошибочной работе оптического канала (режим телеметрии) в течение 10 секунд.

Конструктивно устройство интерфейса выполнено на четырехслойной печатной плате. Топология печатной платы приведена на Рисунке 4.20 (вид снизу) и Рисунке 4.21 (вид сверху).

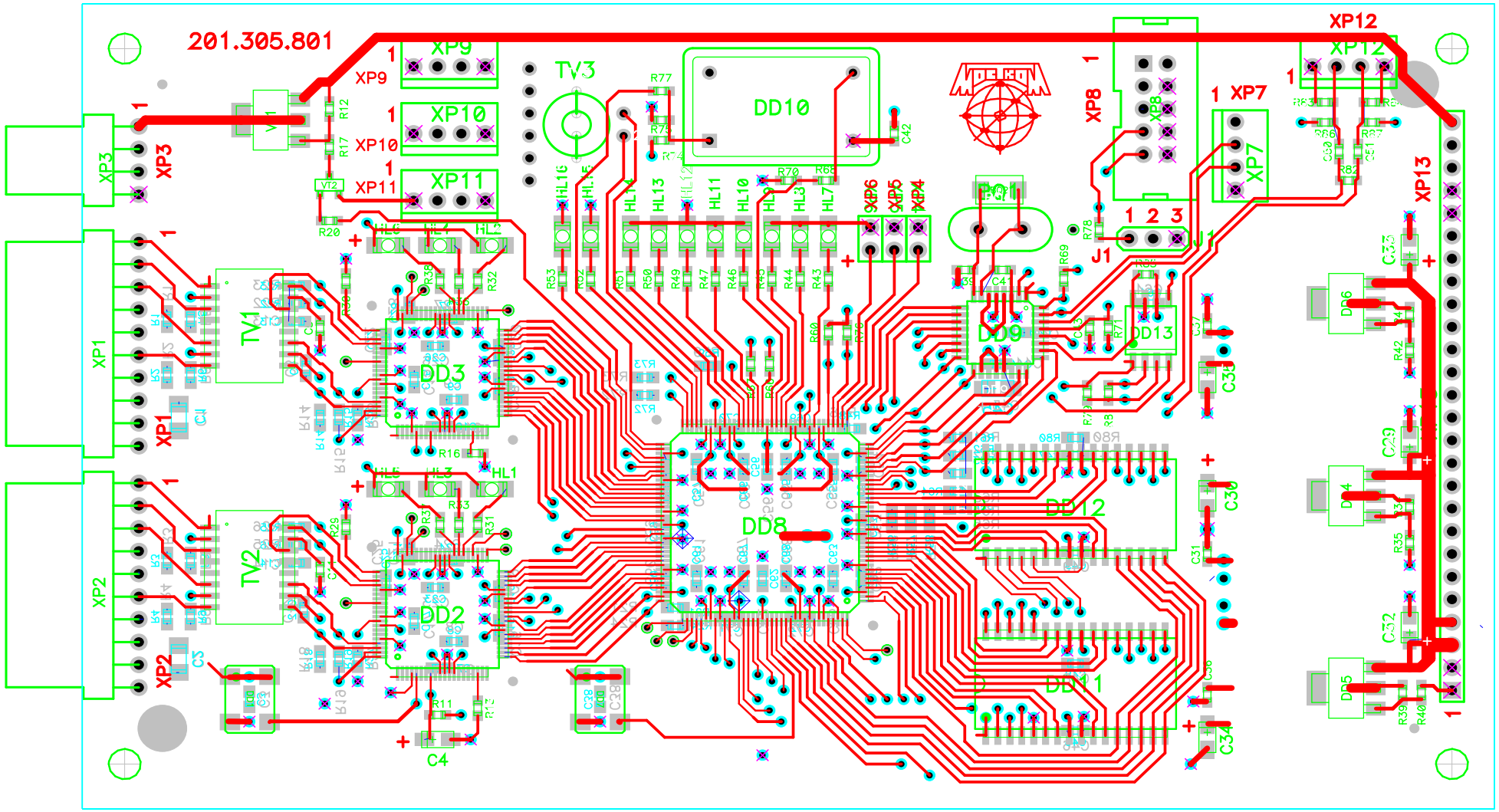

Рисунок 4.20. Печатная плата интерфейсного модуля (вид снизу)

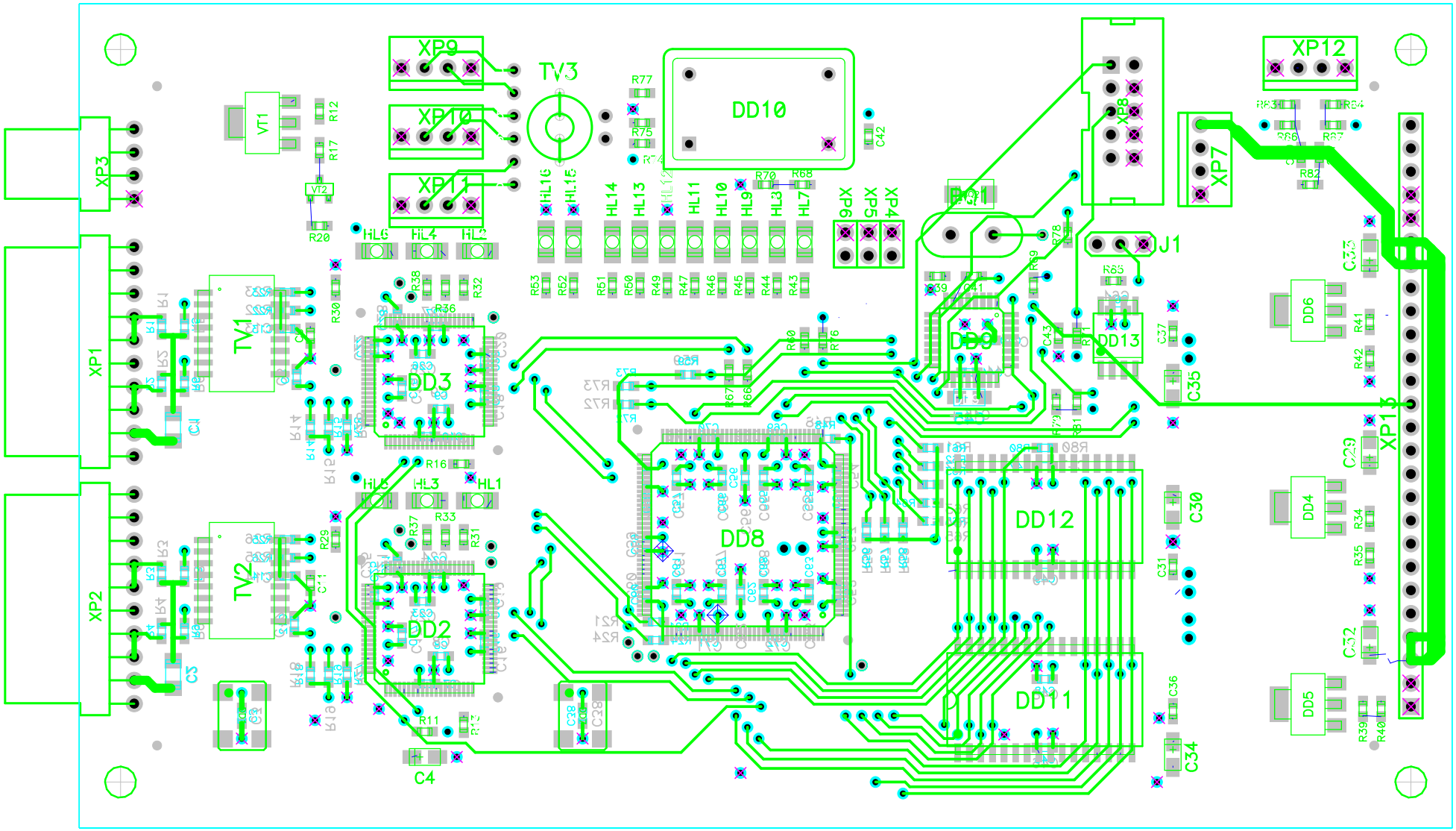

Рисунок 4.21. Печатная плата интерфейсного модуля (вид сверху)

Для отладки, проверки, устранения несоответствий устройства интерфейса используется возможность детального наблюдения процесса работы FPGA при помощи аппаратно программного комплекса включающего в себя JTAG - кабель и комплект программ ChipScopePro Software. Пример наблюдения приема пакета, переданного по оптическому каналу связи (serial_in) в составе рабочего оборудования иллюстрируют приведенные ниже рисунки (Рисунок 4.22 и Рисунок 4.23).

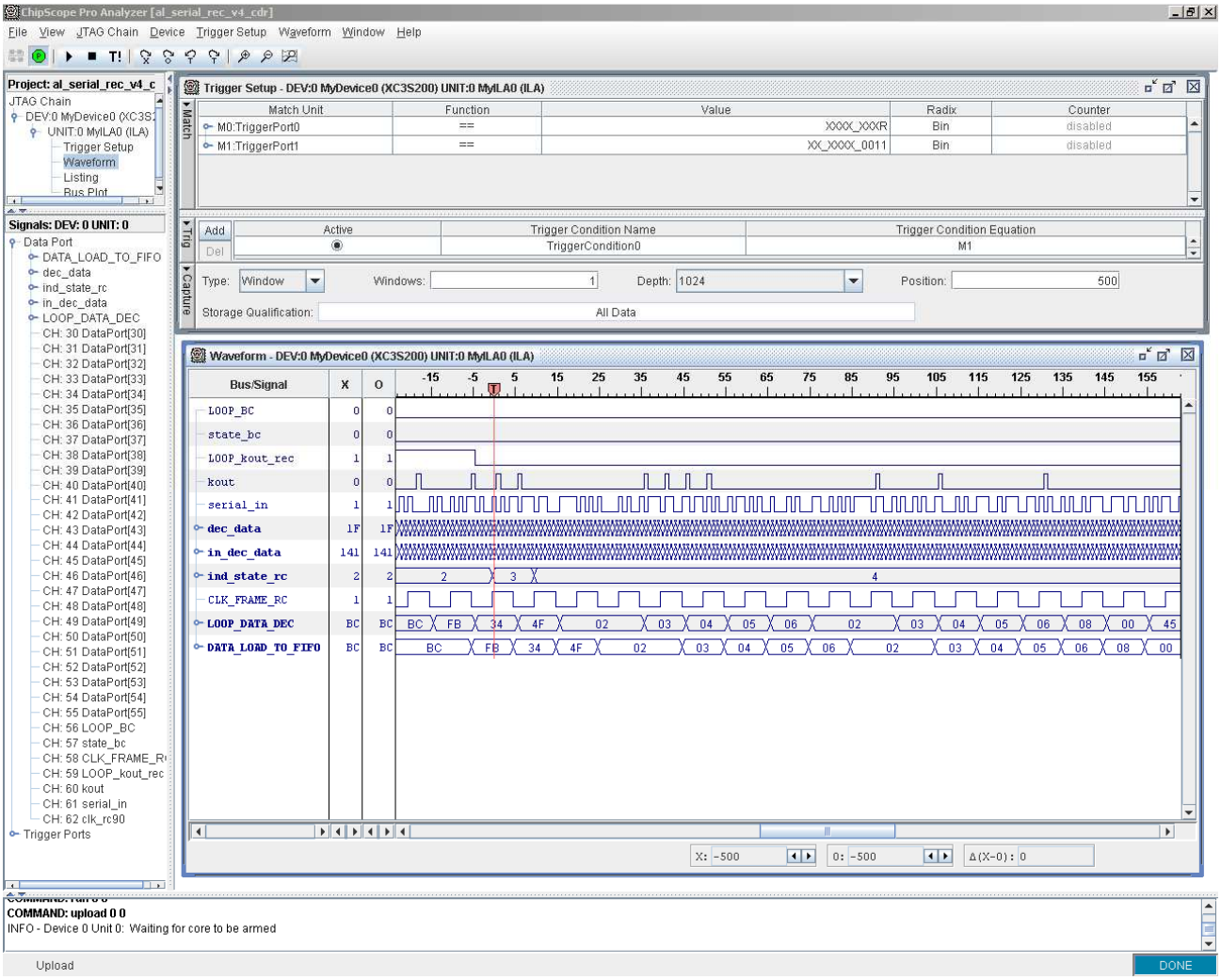

Рисунок 4.22. Прием данных в начале передачи пакета

На первом из них (Рисунке 4.22) в качестве условия старта для захвата начала пакета данных выбрано условие захвата синхронизации, переход автомата приемника из состояния 2 в состояние 3 (ind_state_rc). Для данного временного интервала аппаратно-программный комплекс позволяет осуществлять наблюдение и контроль следующих параметров:

- декодированные данные приема, подготовленные для записи в FIFO (DATA_LOAD_TO_FIFO);

- восстановленная синхронизация записи байта принятой информации (CLK_FRAME_RC).

Следующий рисунок (Рисунок 4.23) иллюстрирует наблюдение данных приема в конце пакета.

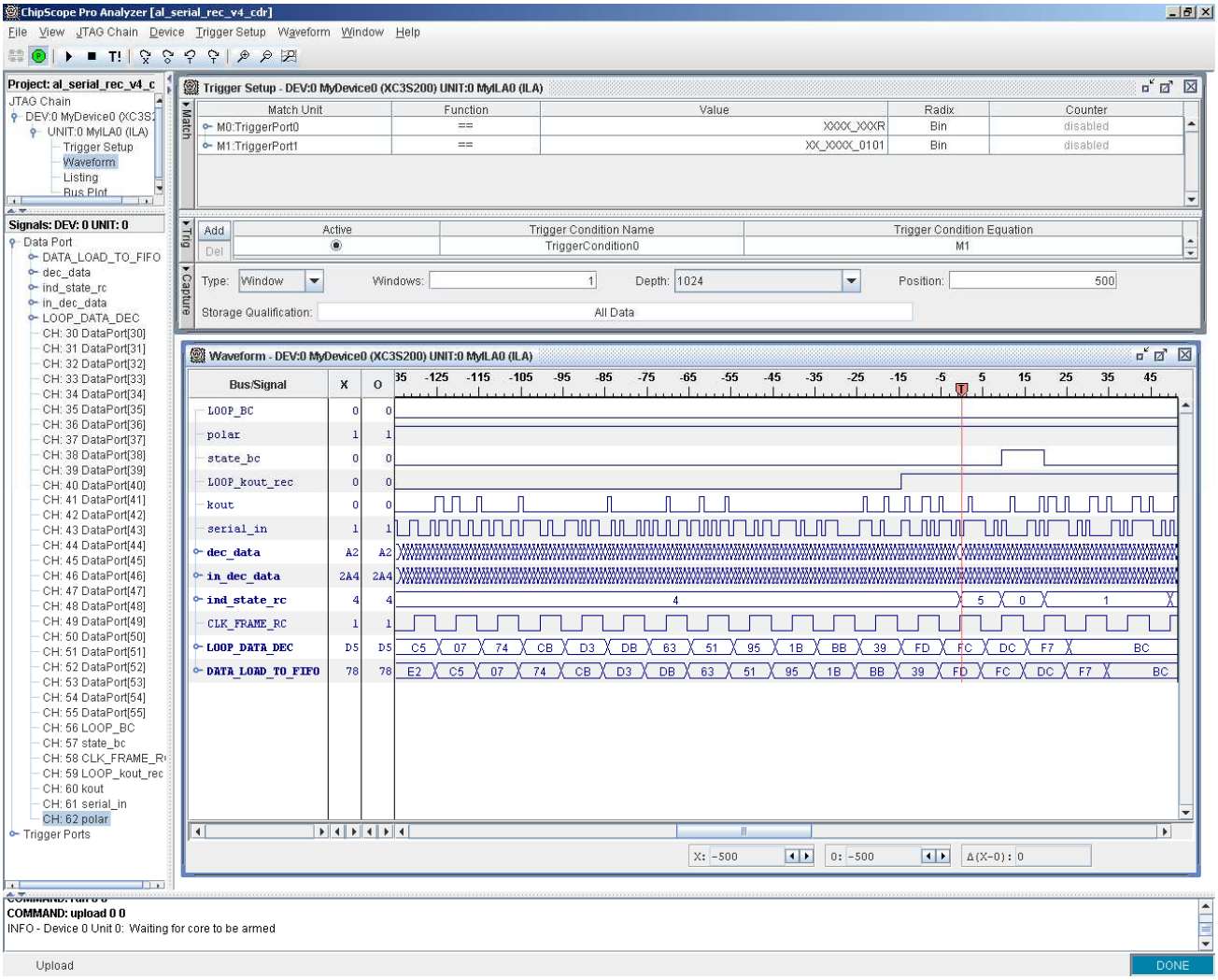

Рисунок 4.23. Прием данных в конце передачи пакета

Столь мощный инструмент, позволяющий наблюдать любые процессы в выбранных временных условиях, становится неотъемлемым инструментом для разработчиков и производителей оборудования передачи данных.

5. Разработка архитектуры оборудования гибридного канала на базе лазерной и радио технологий

5.1. Разработка архитектуры блока аппаратуры атмосферной оптической линии связи и аппаратуры широкополосного радио доступа

В рамках данной работы были сформулированы и исследованы различные критерии автоматического переключения режимов работы гибридной линии связи. Основная цель исследований - это выбор наилучшей системы управления переключением между основным и резервным каналами, а также выбор оптимальных параметров переключения режимов работы данной системы управления. Кроме того, была проведена оценка показателей качества функционирования гибридного оборудования для передачи мультимедийной информации на основе лазерной и радио технологий.

На Рисунке 5.1 представлена блок-схема гибридного канала связи, где упрощенно представлено решение задачи связи двух пользователей по протоколу 100 BASE-TX на рабочей дистанции через среду передачи с использованием оптического и радио диапазонов.

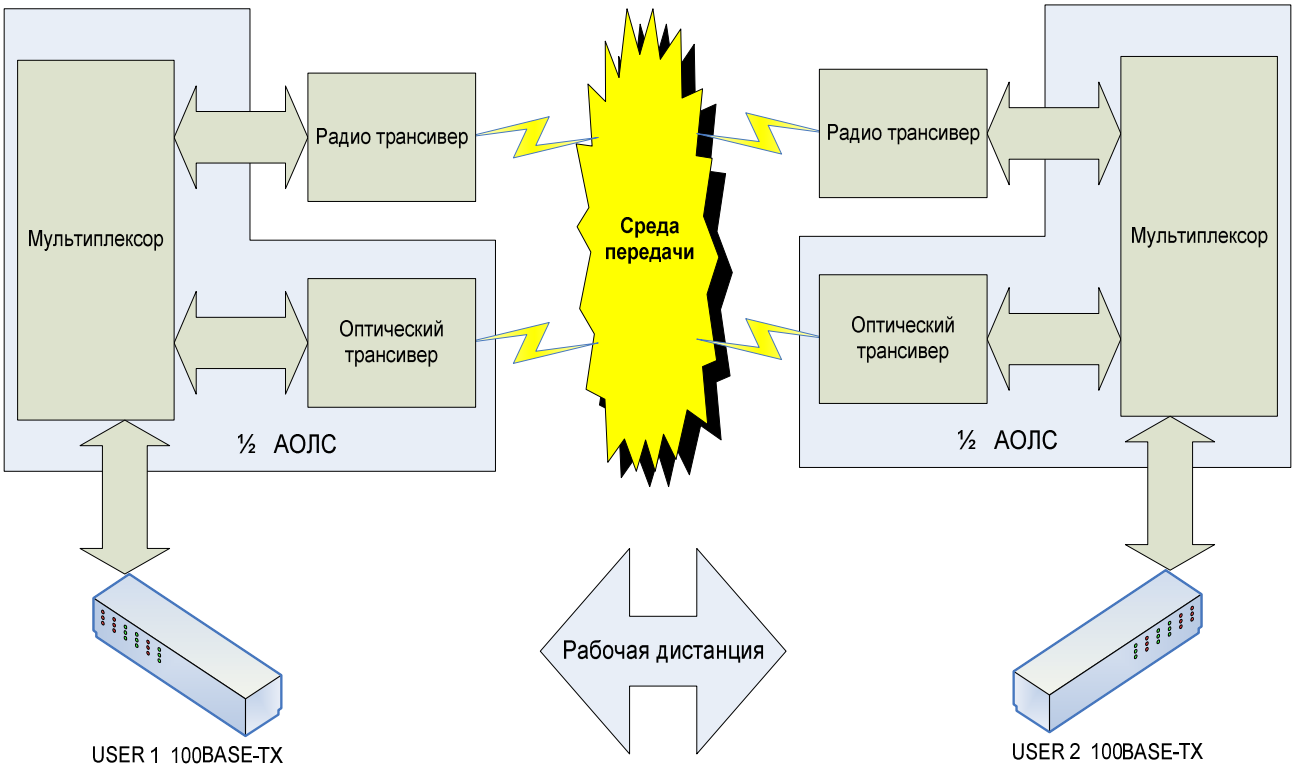

Рисунок 5.1. Блок схема гибридного канала связи

В этом решении радиоканал исполняет роль резервного канала связи. Его работа на рабочей дистанции в текущей среде передачи активируется по событию снижения

надежности передачи данных по основному каналу в оптическом диапазоне аппаратурой АОЛС. Аппаратура АОЛС в этом случае выполняет следующие функции:

1. Организация цепей питания и управление включением резервного радиоканала, имеющего формат проводного интерфейса 100BASE-TX для приема/передачи данных. В этом случае необходимо осуществить подачу питания к этому устройству по технологии PoE (Power over Ethernet), а также выдержать рекомендации оговоренные IEEE802.3af - systems Power Sourcing Equipment (PSE) End-point solutions.

2. Мультиплексирование потока данных для передачи по оптическому или радио каналам. Согласованное мультиплексирование потока данных подразумевает наличие логического интеллектуального устройства, способного корректно принять решение по использованию того или иного канала передачи с учетом стратегии приоритетов пользователя, введенных параметрически при конфигурации аппаратуры.

3. Собственно организация оптического канала связи. Комплекс технических решений предусматривающих:

1) разработку системы пространственной ориентации и стабилизации оптических осей включая узлы электромеханической коррекции и датчики положения текущего положения оптической оси;

2) разработку передатчика и приемника оптического диапазона с длиной волны 785 nm;

3) разработку интерфейсного модуля реализующего транспортное кодирование, CDR (clock-data recovery) блок, мультиплексирование данных пользователя и служебной информации;

4) разработку средств доступа к управлению и контролю работы системы.

Таким образом, архитектурный облик атмосферной оптической линии связи (АОЛС) может быть представлен блок-схемой, как это изображено на Рисунке 5.2.

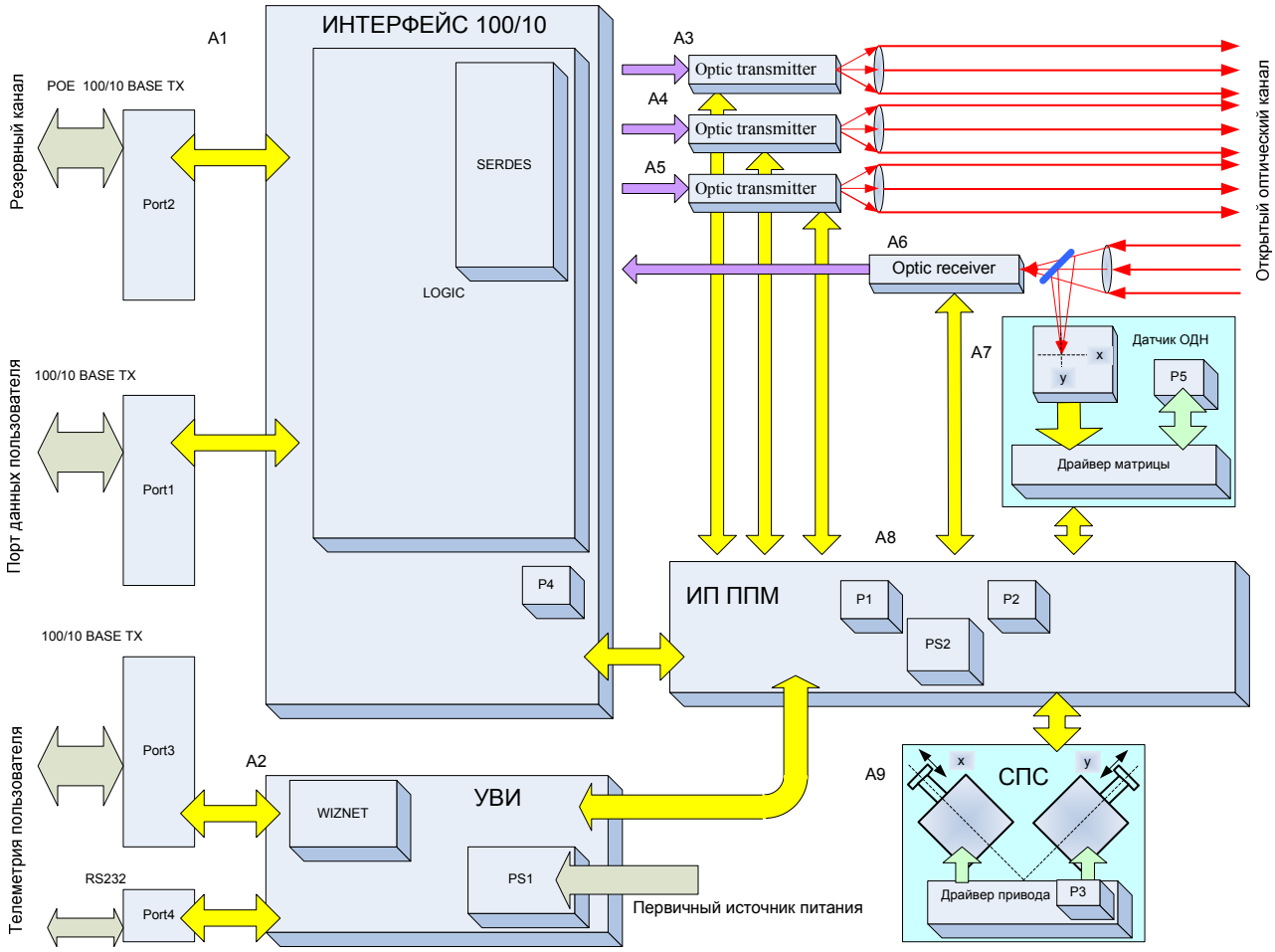

Рисунок 5.2. Архитектура оптического канала связи (АОЛС)

Архитектура в своем составе содержит 9 основных узлов А1 - А9. Преобразование электрического сигнала данных (PECL) в оптический (с длиной волны 785nm) выполняется оптическими передатчиками А3 - А5 с самостоятельными оптическими системами, формирующими диаграмму излучения передатчика. Режим работы передатчика задается и контролируется процессорами Р1, Р2 устройства А8 ИП ППМ (Источник Питания Приемо-передающего Модуля). Оптический приемник А6 выполняет обратное преобразование и имеет самостоятельную оптическую систему. Питание и контроль режима работы приемника А6 также осуществляется при помощи устройства А8 (ИП ППМ). Часть принятого сигнала фокусируется в плоскости приема CMOS image sensor - датчика ОДН (Оси Диаграммы Направленности) А7. При помощи драйвера матрицы и процессора Р5 в устройстве А7 принятый сигнал преобразуется в координаты X, Y - положение оси диаграммы направленности. В последующем, транзитом через устройство А8, данные положения оси диаграммы направленности попадают на устройство А9 СПС (Система Пространственной Стабилизации) и используются в качестве сигнала обратной связи

системы пространственной стабилизации. Драйвер привода, процессор Р3 и соответственно шаговые приводы по координатам X, Y устройства А9 являются исполнительным элементом СПС. К дополнительным функциям устройства относится контроль граничных режимов механических приводов, первичная инициализация начальных геометрических позиций системы.

Блок интерфейса 100/10 (устройство А1) является потокообразующим устройством, осуществляющим согласованное управление интерфейсом пользователя, резервным и оптическим каналами. Конфигурация и контроль устройства пользователем может осуществляться при помощи процессора Р4 и устройства А8 (ИП ППМ). Таким образом, устройство А8 (ИП ППМ), выполняя транзит телеметрических данных, осуществляет формирование, прием и передачу телеметрических пакетов как со стороны локального (LOCAL) приемо-передающего модуля (ППМ), удаленного (REMOTE) ППМ, так и со стороны пользователя. В состав устройства А1 входит интерфейс Ethernet 100/10 Base TX порта данных пользователя (Port 2), а также интерфейс Ethernet 100/10 Base TX порта резервного канала (Port 1), выполненного по технологии PoE (Power over Ethernet).

Телеметрический интерфейс пользователя образован в устройстве А2 УВИ (Устройство Внешнего Интерфейса) в виде гальванически развязанного интерфейса RS232 (Port 4) и Ethernet 100/10 Base TX (Port 3). Взаимное преобразование IP –пакетов в формат совместимый с устройством А8 (ИП ППМ) выполняется специализированной IP-платой блока А2 (УВИ). Дополнительно устройство А2 (УВИ) обеспечивает преобразование первичного источника питания в напряжение +48В посредством устройства PS1 (преобразователь напряжения), необходимое для питания блока А8 (ИП ППМ). В устройстве А8 предусмотрен преобразователь напряжения PS2, который обеспечивает формирование вторичных источников питания (1,25В, 2,5В, 3,3В и 5В), необходимых для функционирования процессоров Р1, Р2 и Р5, а также всех других электронных компонентов схемы атмосферной оптической линии связи (АОЛС).

В качестве резервного канала связи наиболее эффективным решением является использование аппаратуры широкополосного доступа Wi-Fi стандарта IEEE 802.11 a/b/g/n, работающей в диапазонах частот 2,4 ГГц или 5,8 ГГц. Эффективная скорость передачи информации по радиоканалу для оборудования данного класса позволяет осуществлять пропуск трафика со скоростью до 300 Мбит/с.

Архитектура аппаратуры широкополосного радио доступа (радиомаршрутизатор) представлена на Рисунке 5.3.

Функционально архитектура в своем составе содержит три основных узла В1 – В3, а также четыре дополнительных модуля.

Устройство В1 выполняет функции приемопередатчика, работающего в диапазоне высоких частот (2,3-2,5 или 4,9-6,1 ГГц). В его состав входят следующие модули:

- Приемник высокочастотных сигналов резервного канала Wi-Fi от абонентской станции;

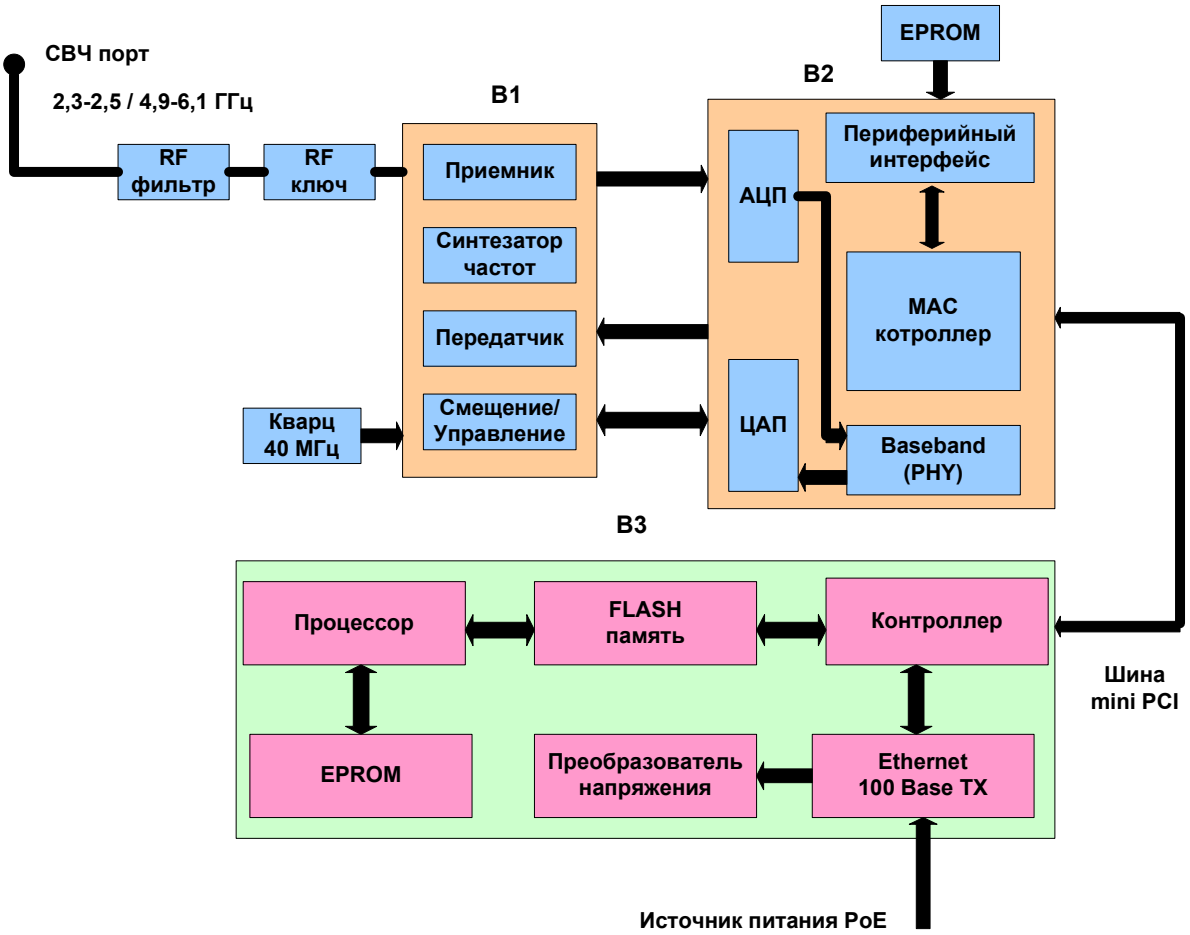

Рисунок 5.3. Архитектура аппаратуры широкополосного радио доступа

- Передатчик высокочастотных сигналов резервного канала Wi-Fi в сторону абонентской станции;

- модуль Синтезатор частот, который осуществляет формирование несущей частоты резервного канала Wi-Fi. В состав модуля входят умножители и делители частоты для корректного формирования всей доступной линейки каналов частотных диапазонов СВЧ (согласно нормам стандарта IEEE 802.11 a/b/g/n) из сигнала генератора опорной частоты;

- модуль Смещение/Управление, который осуществляет управление всеми модулями, входящими в состав устройства В1 и позволяет выбрать канал приема/передачи информации из всей возможной линейки частот для СВЧ диапазонов 2,3-2,5 или 4,9-6,1

ГГц. Кроме того данный модуль осуществляет процессы модуляции и демодуляции сигналов в режимах приема и передачи информации по каналу Wi-Fi.

В качестве генератора опорной частоты для формирования несущей частоты Wi-Fi канала приема/передачи информации используется дополнительный модуль Кварц 40 МГц, формирующий частоту 40 МГц и подключенный к устройству В1.

В тракт приема/передачи сигнала резервного канала Wi-Fi непосредственно в эфир включены дополнительные модули:

- модуль RF ключ выполняет функцию электронного переключения СВЧ тракта из режима передачи в режим приема и обратно в зависимости от сигналов управления из устройства В1;

- модуль RF фильтр выполняет функцию фильтрации паразитных излучений и гармоник СВЧ диапазона, которые могут повлиять на корректную работу СВЧ тракта приема/передачи.

Непосредственно за модулем RF фильтр расположен СВЧ порт для подключения антенной системы, которая осуществляет прием/передачу сигнала Wi-Fi в эфир.

Устройство В2 выполняет одновременно функции MAC-контроллера и интерфейса связи с платой процессорного модуля по цифровой шине mini PCI. В его состав входят следующие модули:

- аналого-цифровой преобразователь АЦП сигналов, приходящих из модуля Приемник устройства В1;

- цифро-аналоговый преобразователь ЦАП, формирующий сигналы для модуля Передатчик устройства В1;

- модуль MAC (Media Access Control) контроллер выполняет функции контроллера канального уровня сетевой модели OSI;

- модуль Baseband PHY (физический уровень для передачи данных без модуляции) выполняет функции подключения контроллера канального уровня (модуль MAC) к физической среде передачи данных сетевой модели OSI;

- Периферийный интерфейс выполняет функции управления и приема/передачи данных модулем MAC контроллер.

В модуле памяти EPROM (ПЗУ) хранятся все переменные, используемые по умолчанию при работе устройства В2.

Функционально устройства В1 и В2, а также четыре дополнительных модуля можно объединить в единый узел – модуль радиоканала.

Устройство В3 выполняет одновременно функции процессорного модуля и интерфейса Ethernet 100 Base TX порта данных. В его состав входят следующие модули:

- Контроллер выполняет функции управления и взаимодействия со всеми модулями устройств В2 и В3;

- Процессор выполняет все функции обработки команд операционной системы;

- модуль EPROM (ПЗУ) выполняет функции хранения операционной системы, программ управления и мониторинга, а также всех постоянных и переменных значений, используемых по умолчанию;

- FLASH память (ОЗУ) выполняет функции оперативной памяти;

- модуль Ethernet 100 Base TX выполняет функции интерфейса порта данных. Кроме того, благодаря технологии PoE (Power over Ethernet) через данный порт осуществляется подача напряжения от первичного источника питания для функционирования аппаратуры широкополосного радио доступа;

- модуль Преобразователь напряжения обеспечивает формирование вторичных источников питания (1,25В, 2,5В, 3,3В и 5В) для функционирования всех устройств и модулей аппаратуры широкополосного радио доступа резервного канала связи.

В дополнение к изложенной выше архитектуре аппаратуры широкополосного радио доступа, которая была представлена для стандарта IEEE 802.11a/b/g, необходимо также рассмотреть изменения и дополнения, которые присущи аппаратуре стандарта IEEE 802.11n.

Стандарт IEEE 802.11n предназначен для дальнейшего расширения диапазона скоростей передачи данных — до 300 Мбит/с и выше. В целом же он основывается на рассмотренном выше стандарте (дополнении) IEEE 802.11a, поскольку именно в нем описана технология OFDM. Увеличение скорости передачи данных в стандарте IEEE 802.11n базируется на двух физических принципах — удвоении полосы пропускания канала с 20 до 40 МГц и введении дополнительных антенных каналов приема-передачи (технология многоканальных антенных систем MIMO).

Стандарт IEEE 802.11n допускает как стандартные каналы с шириной полосы 20 МГц (как и все предшествующие стандарты IEEE 802.11, включая IEEE 802.11a), так и расширенные до 40 МГц. Поскольку каналы шириной 40 МГц приемлемы не для всех стран, противореча национальной политике распределения частотных ресурсов, то их применение — это опциональная (необязательная) возможность.

Стандарт IEEE 802.11n предусматривает поддержку как традиционных режимов передачи (как в IEEE 802.11a), так и режимов с высокой пропускной способностью (HT — High Throughput).

Поскольку стандартом IEEE 802.11n предусмотрена технология MIMO, изменяется структурная схема передающего и приемного устройств (Рисунок 5.4). Данные после

скремблирования поступают на сверточный кодер (как и в IEEE 802.11a). Если скорость передачи данных превышает 300 Мбит/с, используются два сверточных кодера. В отличие от IEEE 802.11a, поддерживается скорость кодирования 5/6. Кроме того, опционально вместо двоичного сверточного кодера (BCC) предусмотрено применение блокового кодера LDPCC (Low density parity check codes).

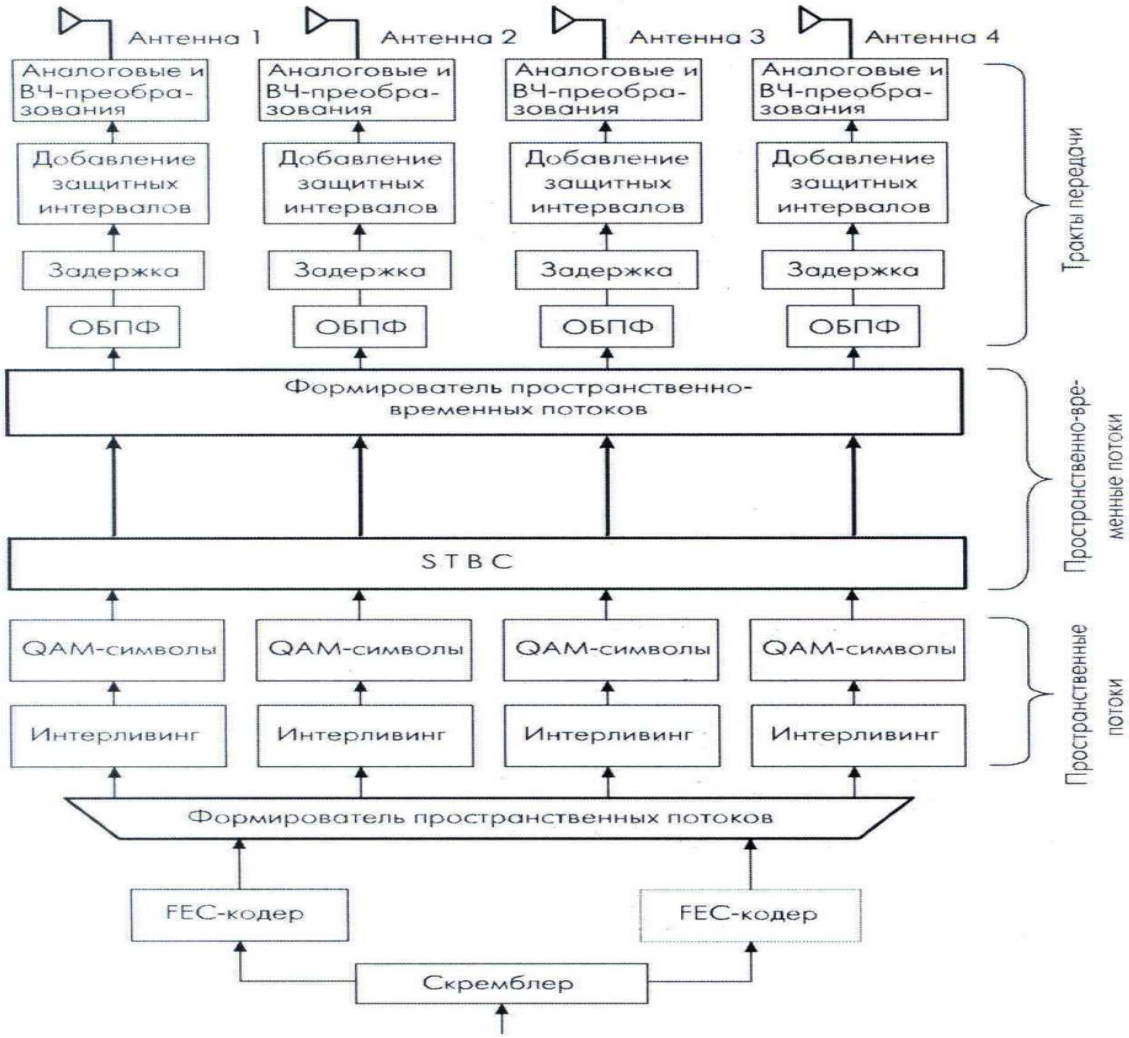

Рисунок 5.4. Структура аппаратуры передачи стандарта IEEE 802.11n

Для функционирования модуля радиоканала необходимо наличие драйвера, размещенного на плате процессорного блока радиомаршрутизатора.

Драйвер модуля радиоканала встроенной операционной системы радиомаршрутизатора – это специфическое программное обеспечение для работы аппаратного комплекса радиомаршрутизатора, а именно, выполняющее связь между встроенной операционной системой и модулем радиоканала. Драйвер модуля радиоканала реализует работу MAC уровня семейства протоколов IEEE 802.11, а также множество функций по настройке правильной работы модуля радиоканала и обеспечению качества

обслуживания (QoS) для абонентов, работающих по радиоканалу. Кроме того, в драйвере модуля радиоканала был реализован алгоритм адаптивного динамического опроса (так называемый механизм поллинга), а также поддержка протокола автоматической подстройки мощности сигнала удаленного абонентского устройства. Данный протокол автоматической подстройки предназначен для выравнивания соотношения сигнал/шум для каждой из клиентских станций, ассоциированных с базовой станцией, за счет передачи служебной информации, регулирующей выходную мощность передатчика каждого абонентского устройства.

Драйвер модуля радиоканала включает в себя модуль управления устройством посредством конфигурирования регистров, так называемый уровень аппаратной абстракции (HAL - Hardware Abstract Layer), модуль связи с ядром встроенной операционной системы и модуль, реализующий работу семейства протоколов IEEE 802.11.

В качестве модуля радиоканала радиомаршрутизатора выбраны платы семейства стандартов IEEE 802.11 на основе чипсетов AR5004X и AR5006X компании Atheros (адрес в Интернет http://www.atheros.com/). Данный выбор обусловлен тем, что на сегодняшний день чипсеты компании Atheros наиболее динамично развиваются, реализуя все больше особенностей семейства протоколов IEEE 802.11, которые постоянно добавляются разработчиками этого семейства стандартов.

В качестве модуля конфигурирования регистров (HAL) был выбран свободно распространяемый модуль Atheros HAL, который позволяет работать со всеми существующими на сегодняшний день чипсетами компании Atheros. Преимущество данного выбора заключается в том, что эта реализация наиболее полно позволяет использовать все возможности чипсетов и является исключительно стабильной.

Для реализации модуля связи с ядром и семейства протоколов IEEE 802.11, в качестве основы был выбран свободно распространяемый драйвер с исходными текстами MadWiFi.

В исходный код драйвера было внесено множество изменений для реализации алгоритма адаптивного динамического опроса, алгоритма автоматической подстройки мощности сигнала удаленного абонентского устройства, регулирующей выходную мощность передатчика каждого абонентского устройства, а также для увеличения быстродействия и стабильности работы драйвера. Также было исправлено множество программных ошибок присутствующих в исходной реализации драйвера MadWiFi.

В части реализации в драйвере модуля радиоканала алгоритма адаптивного динамического опроса в исходный код драйвера MadWiFi были добавлены следующие программные функции:

- реализована функция установки дескриптора очередей для установки минимального CW (Contention Window), DIFS (DCF Interfame Space) и PIFS (PCF Interframe Space), а также для полного выключения post-backoff, что является одним из необходимых условий реализации алгоритма адаптивного динамического опроса;

- реализована функция контроля количества ретрансмиссий (повторных передач), полностью реализована функция программного контроля количества ретрансмиссий для эффективности алгоритма адаптивного динамического опроса;

- реализована функция установки полного диапазона частот поддерживаемого устройством для использования устройства в расширенном диапазоне частот;

- реализована функция, создающая программные очереди на стороне клиента с учетом приоритета пакетов и качества обслуживания (QoS);

- реализована функция, создающая несколько очередей в базовой станции с учетом приоритета пакетов и качества обслуживания (QoS);

- внесены изменения в обработчик прерываний для быстрого реагирования на служебные CF-Poll пакеты, что позволяет начать передачу пакета данных уже через время равное SIFS (Short Interframe Space);

- реализована функция перехода из режима DCF по приходу служебного пакета beacon с установленным полем CF-Count равным нулю в режим PCF на стороне клиента, сопровождаемая полной перестройкой системы очередей;

- реализована функция перехода из режима PCF в режим DCF по приходу служебного пакета CF-End, сопровождаемая полной перестройкой очередей;

- реализована функция ожидания отсылки пакета до прихода служебного пакета CF-Poll;

- реализована функция распределения посылки пакетов клиентам в соответствии с алгоритмом адаптивного динамического опроса в базовой станции, а также контроля переходов из режима DCF в режим PCF и обратно;

- реализована функция, осуществляющая правильную рассылку широковещательных пакетов в режиме PCF;

- реализована функция подключения новых клиентов в режиме PCF, что потребовало полной переработки механизма ассоциации клиентов.

Набор данных изменений позволил полностью реализовать алгоритм адаптивного динамического опроса для плат модуля радиоканала, основанных на чипсетах компании Atheros.

Для управления драйвером платы модуля радиоканала применяются программные средства Linux Wireless Extension и Linux Wireless Tools, которые являются проектом с

открытым кодом. Данные программные средства взаимодействуют с программой управления и мониторинга встроенной операционной системы и, таким образом, программа управления и мониторинга осуществляет управление и мониторинг драйвера и модуля радиоканала.

Wireless Extension (WE) это стандартный интерфейс для управления драйверами беспроводных плат. Этот интерфейс позволяет операционной системе видеть любую плату под управлением даже самого специфического драйвера как стандартное обобщенное беспроводное устройство. Другое преимущество такого интерфейса в том, что параметры драйвера могут быть изменены “на лету” без перезапуска драйвера.

Wireless Tools (WT) – это ряд утилит, осуществляющих управление драйвером с помощью Wireless Extensions. Эти утилиты используют текстовый интерфейс и очень просты и удобны для управления драйвером платы модуля радиоканала.

При подаче питания на плату модуля радиоканала все рабочие переменные чипсета берутся из EPROM. После загрузки драйвера они заменяются на переменные программного модуля драйвера, реализующего функции уровня аппаратной абстракции (HAL).

Драйвер модуля радиоканала встроенной операционной системы радиомаршрутизатора записан на промышленный носитель типа FLASH, который представляет собой микросхему, установленную на плате процессорного модуля радиомаршрутизатора.

После загрузки ядра встроенной операционной системы радиомаршрутизатора, ядро осуществляет загрузку, запуск, а также конфигурирование драйвера модуля радиоканала.

Входными данными драйвера модуля радиоканала являются информационные пакеты третьего уровня модели OSI, получаемые от ядра встроенной операционной системы радиомаршрутизатора, а также, управляющие сигналы, от программы управления и мониторинга встроенной операционной системы радиомаршрутизатора.

Выходными данными драйвера модуля радиоканала являются информационные пакеты третьего уровня модели OSI, передаваемые ядру встроенной операционной системы радиомаршрутизатора, а также, сигналы мониторинга, передаваемые программе управления и мониторинга встроенной операционной системы радиомаршрутизатора.

5.2 Обобщение результатов предыдущих этапов работ. Оценка полноты решения задач и эффективности полученных результатов в сравнении с современным научно-техническим уровнем.

Высокоскоростные гибридные системы связи на базе лазерной и радио технологий, обладающие операторской надежностью, широко используются для решения «проблемы

последней мили», построения локальных и региональных сетей передачи мультимедийной информации.

Неблагоприятные погодные условия, такие как снег, туман и т.д. могут значительно снизить эффективный диапазон работы лазерных атмосферных каналов связи. В то же время функционирование радиоканала IEEE 802.11 практически не зависит от погодных условий, а на производительность канала миллиметрового диапазона радиоволн не оказывает влияние туман. Именно такое взаимодополняющее поведение лазерных и широкополосных радиоканалов и позволило выдвинуть концепцию гибридных систем операторского класса, надежно функционирующих в любых погодных условиях, исследование и разработка которых проведена в настоящей НИР.

Итогом выполнения НИР являются новые теоретические и практические результаты мирового уровня. Дано описание оригинальной архитектуры гибридной системы связи, включающей параллельно работающие атмосферный лазерный канал и радио канал миллиметрового диапазона волн (Е-диапазона 71-76 ГГц и 81-86 ГГц) – горячий резерв и канал, функционирующий под управлением протоколов IEEE 802.11n – холодный резерв. Такая гибридная система связи обладает операторской надежностью и высокой производительностью (свыше 2 Гбит/с). Оригинальность разработки подтверждена проведенным патентным поиском и получением патента на изобретение «Многоканальная система передачи информации повышенной надежности на базе лазерной и радио технологий» по заявке № 2011128081 от 08.07.2011г. (Авторы: Вишневский В.М., Кузнецов Н.А., Шаров С.Ю.).

Теоретические результаты опубликованы в рецензируемых журналах:

1. Проблемы информатики (2010г.). [18]
2. Управление большими системами (2011г.). [51]
3. Automation and Remote Control (2013г. в печати). [52]
4. Радиотехника и электроника [55].

Результаты исследований докладывались и опубликованы в трудах следующих международных конференций:

- Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем», РУДН, Москва, 2011г.;
- Distributed Computer and Communication Networks (DCCN), Moscow, 2011г.

Для экспериментального подтверждения проектных решений разработан комплекс имитационных (машинных) моделей и пакет прикладных программ оценки характеристик надежности и производительности гибридной системы связи. На разработанные программные средства получено Свидетельство о государственной регистрации программ

для ЭВМ № 20122611411 «Программный комплекс аналитического и машинного (имитационного) моделирования гибридного канала связи», зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 06.02.2012г.

Будет подана заявка на получение свидетельства о регистрации программы «Программный комплекс оценки надежности гибридных систем на базе лазерных и радиотехнологий» .

По тематике НИР планируется защита кандидатских диссертаций аспиранта Шарова С.Ю., аспиранта Ларионова А.А. в конце 2012 г. на диссертационном совете Московского технического университета связи (МТУСИ). В декабре 2012 г. в МФТИ планируется защита кандидатской диссертации Ю.А.Дмитриева. В начале 2013 г. планируется защита докторской диссертации Винеля А.В. в диссертационном совете МТУСИ.

Работы по НИР проводились с сентября 2010г. по ноябрь 2012 г. Было выпущено 5 томов промежуточных отчетов.

В промежуточном отчете 2010 г. проведен анализ научно-технической литературы и нормативно-технической документации (стандартов) по проблемам широкополосной и сверхширокополосной связи. Впервые в отечественной литературы дано систематизированное описание принципов построения и реализации сверхвысокоскоростных каналов и сетей связи миллиметрового диапазона радиоволн. Описаны этапы стандартизации оборудования миллиметрового диапазона и сравнительный анализ характеристик оборудования, выпускаемого различными фирмами. Рассмотрены направления развития аппаратно-программных средств гибридных каналов связи. Приведены методы расчета и выбора оптимальных параметров разрабатываемых гибридных каналов связи. Исследованы влияния шумов и помех на выбор параметров гибридной линии связи. В заключительном разделе дан сравнительный анализ существующих протоколов беспроводных сетей мультимедийной информации.

В промежуточном отчете первой половины 2011г. проведен анализ литературы по исследованию характеристик гибридных систем связи. На основе анализа большого количества зарубежных работ, опубликованных в период с 2005 г. по 2011 г., показано, что основные исследования проведены с использованием имитационного моделирования и направлены на оценку характеристик надежности в стационарном режиме. В отчете впервые предложены и исследованы две математические модели гибридного канала передачи данных: модели с резервным радиоканалом (когда оптический канал и радиоканал используются поочередно – холодный резерв радиоканала) и модели с параллельным использованием радиоканала – горячий резерв радиоканала миллиметрового диапазона радиоволн. В разделе 2.1 построена и исследована модель с резервным радиоканалом в

рамках теории массового обслуживания. Используется метод вложенных цепей Маркова. С помощью матрично-аналитического подхода получены стационарные вероятности состояний системы во вложенные моменты. Также получено стационарное распределение состояний системы в произвольные моменты времени, приведены основные характеристики производительности. В разделе 2.2 представлена модель гибридного канала с параллельным использованием радиоканала. Получен критерий существования стационарного режима и получено стационарное распределение марковского процесса, описывающего состояния системы в произвольный момент времени, а также приведены основные характеристики производительности системы. В разделе 3 описана имитационная модель для гибридного канала с резервным радиоканалом. Отметим, что численные расчеты позволяют получать не только характеристики надежности, но и в отличие от известных зарубежных работ и характеристики производительности, включая длины очередей пакетов и средние времени их пребывания в гибридной системе и т.д. Отметим также, что результаты отчета имеют самостоятельное значение, внося вклад в общую теорию стохастических систем массового обслуживания с ненадежными обслуживающими приборами.

В промежуточном отчете о НИР второй половины 2011г. дано описание разработанного пакета прикладных программ, на базе которого проведен численный анализ вариантов построения гибридного канала передачи мультимедийной информации. В разделе 3.1 приведено общее описание пакета программ аналитического и имитационного моделирования. Описаны модели, реализованные в настоящей версии пакета программ, включая: аналитические и имитационные модели гибридной системы с холодным резервом (канал IEEE 802.11n); гибридная система с горячим резервом (радиоканал миллиметрового диапазона радиоволн); гибридный канал с двумя резервными радиоканалами. В разделах 3.2 – 3.4 приведена высокоуровневая архитектура пакета программ и описание функциональных блоков: графический пользовательский интерфейс; консольный интерфейс; функциональные блоки для расчета математических и имитационных моделей; модуль управления; блок вспомогательного функционала. В разделе 3.2 рассмотрены вопросы отладки алгоритмов работы и их оптимизация с целью сокращения времени расчетов и моделирования. Приводится описание применения пакета программ, руководство пользователя и программиста. В разделах 3.3 и 3.4 дано описание численных результатов, полученных с использованием пакета программ, и сопоставление результатов аналитического и машинного моделирования. В приложении представлены:

- заявка о выдаче патента на изобретение «Многоканальная система передачи информации повышенной надежности на базе лазерной и радио технологий»;

- заявка на свидетельство о регистрации программ для ЭВМ «Пакет программ аналитического и машинного (имитационного) моделирования гибридного канала связи на базе лазерной и радио технологий» и листинги пакета программ.

В промежуточном отчете первой половины 2012 г. дано описание технологии переключения между каналами в гибридной системе. Разработаны и исследованы механизмы и алгоритмы переключения, оказывающие влияние на производительность и надежность гибридной системы. Исследованы различные методы сглаживания колебаний уровня оптического сигнала, включая механизмы мощностного и временного гистерезиса, фильтрацию и т.д., предотвращающие частые операции по переключению каналов. Дано описание функционирования разработанного устройства переключения каналов. Осуществлен выбор оптимальных параметров для автоматического переключения режимов работы гибридного канала по следующим критериям работоспособности канала: отношение сигнал/шум; скорость передачи информации; частота приема/передачи ошибочных бит информации; соотношение продолжительности работы основного и резервного каналов. Проведен выбор элементной базы и разработана электронная схема интерфейсной платы.

В отличие от известных методов переключения в настоящей НИР в качестве критерия исправности оптического канала предложено применять признак успешного приема служебного телеметрического пакета, причем в интервале времени, не превышающем 1 сек. В составе принятого пакета должен быть установлен аналогичный признак о состоянии приема на удаленной стороне. В противном случае при наличии LINK резервного канала происходит переход на резервный канал. Такой подход позволяет значительно сократить время переключения по с равнению с другими известными алгоритмами, и тем самым повысить производительность гибридной системы.

В заключительном отчете (вторая половина 2012 г.) дано описание архитектуры блока аппаратуры атмосферной оптической линии связи и резервной широкополосной радиолинии, а также аппаратно-программного комплекса сопряжения основного и резервного канала. Приведено обобщение результатов предыдущих этапов работ. Дана оценка полноты решения задач и их сравнение с современным научно-техническим уровнем. Дано также описание программы внедрения результатов НИР в образовательный процесс в МФТИ на кафедре «Инфокоммуникационных систем и сетей».

Оценивая работу в целом необходимо отметить, что она выполнена на мировом уровне (в теоретической части превосходит мировой уровень). Работа полностью соответствует требованиям технического задания и календарного плана.

5.3 Разработка программы внедрения результатов НИР в образовательный процесс

Основные результаты НИР внедрены в образовательный процесс по направлению 010900 «Прикладные математика и физика», магистерская программа 010974 «Телекоммуникационные сети и системы» на кафедре «Инфокоммуникационные системы и сети» на факультете радиотехники и кибернетики МФТИ (ИСС ФРТК МФТИ). Внесены дополнения (без увеличения количества лекционных часов) в уже существующие учебные курсы для студентов 5 курса, обучающихся на кафедре ИСС ФРТК. Курс лекций «Стандарты широкополосных беспроводных сетей» расширен с целью ознакомления студентов с архитектурой гибридных систем связи и их составных частей. Курс лекций «Методы проектирования широкополосных беспроводных сетей» будет расширен с целью ознакомления студентов 5-го курса ФРТК с математическими методами оценки производительности и надежности гибридных систем передачи мультимедийной информации.

Ниже приводится описание содержания лекций, включенных в курсы по широкополосной беспроводной связи.

Лекция 1. Атмосферные лазерные каналы передачи мультимедийной информации.

1.1. Преимущества и недостатки атмосферных лазерных каналов связи.

1.2. Затухание оптических сигналов в атмосфере.

1.3. Расчет оптической схемы атмосферного лазерного канала связи.

1.4. Архитектура приемо-передатчика лазерной линии.

1.5. Сравнительный анализ характеристик аппаратуры лазерных каналов российских и зарубежных производителей.

Лекция 2. Высокоскоростные сети и каналы связи миллиметрового диапазона радиоволн.

2.1. Исторический очерк развития стандартов персональных и локальных сетей миллиметрового диапазона радиоволн.

2.2. Особенности Е-диапазона миллиметровых радиоволн.

2.3. Сверхвысокоскоростные радиорелейные каналы в Е-диапазоне.

2.4. Технические характеристики радиорелейной аппаратуры Е-диапазона.

2.5. Принципы построения самоорганизующихся MESH-сетей миллиметрового диапазона радиоволн.

Лекция 3. Гибридные системы связи на базе лазерной и радио технологий.

3.1. Преимущества и недостатки лазерных атмосферных каналов связи.

3.2. Архитектура гибридной системы резервирования лазерного канала радиоканалом миллиметрового диапазона радиоволн (горячий резерв).

3.3. Использование резервного канала, функционирующего под управлением протокола IEEE 802.11n (холодный резерв).

3.4. Оценка характеристик надежности и быстродействия гибридной системы связи.

Лекция 4. Математическая модель гибридной системы связи с резервным радиоканалом IEEE 802.11n (холодный резерв).

4.1. Стохастическая система массового обслуживания с ненадежным обслуживающим прибором и случайным временем переключения на резервный канал.

4.2. Метод вложенных цепей Маркова для оценки стационарных вероятностей состояний.

4.3. Расчет основных характеристик надежности и производительности.

4.4. Имитационная (машинная) модель гибридной системы с резервным радоканалом IEEE 802.11n.

Лекция 5. Исследование характеристик гибридной системы с резервным каналом миллиметрового диапазона радиоволн (горячий резерв).

5.1. Математическая модель теории очередей, адекватно описывающая функционирование гибридной системы.

5.2. Критерий существования стационарного режима.

5.2. Стационарные вероятности состояний случайного процесса в произвольный момент времени.

5.4. Алгоритм вычисления характеристик надежности и производительности.

5.5. Принципы построения и реализации пакета прикладных программ оценки производительности и проектирования гибридных систем.

5.4. Разработка аппаратно-программного комплекса сопряжения основного и резервного каналов

Аппаратно-программный комплекс гибридной линии связи на базе лазерной и радиотехнологий включает в себя два идентичных комплекта оборудования для связи двух пользователей по протоколу 100 BASE-TX.

Состав оборудования гибридной линии связи представлен в Таблице 5.1.

Таблица 5.1. Состав оборудования гибридной линии связи

Наименование блока	Количество
Приемо-передающий модуль Artolink M1 FE (ППМ)	2
Устройство внешнего интерфейса (УВИ)	2
Кабель внешнего интерфейса (КВИ)	2
Соединительный сигнальный кабель (ССК)	2
Беспроводный радиомаршрутизатор «Рапира»	2

Структурная схема аппаратно-программного комплекса гибридной линии связи на базе лазерной и радиотехнологий представлена на Рисунке 5.5.

Гибридный канал образуется двумя приемопередающими модулями (ППМ) оборудования беспроводной оптической связи Artolink M1 FE и двумя радиомаршрутизаторами «Рапира». К ППМ подключены устройства внешнего интерфейса (кабелем КВИ) и соединительные сигнальные кабели (ССК). Блоки радиомаршрутизаторов подключаются к порту 2 каждого ППМ. Данная схема соединения представляет собой гибридный канал связи и обеспечивает соединение точка-точка по протоколам Ethernet/Fast Ethernet.

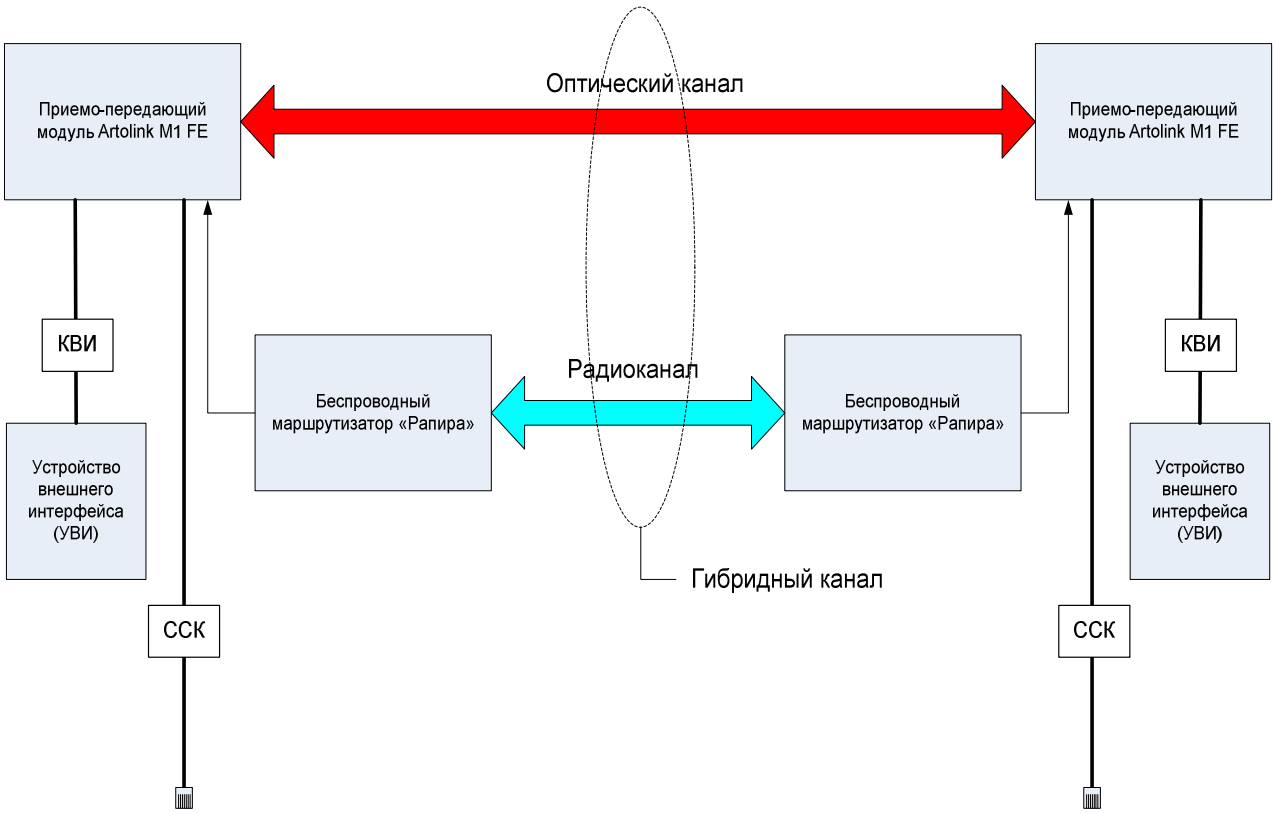

Рисунок 5.5. Структурная схема аппаратно-программного комплекса гибридной линии связи

Функциональная схема аппаратно-программного комплекса гибридной линии связи приведена на Рисунке 5.6.

ППМ Artolink получает питание (постоянное напряжение 48 В) по кабелю КВИ от устройства внешнего интерфейса (УВИ). По этому же кабелю передаются сигналы мониторинга и управления ППМ. Мониторинг и управление осуществляется с помощью персонального компьютера, подключенного к УВИ из специальной программы Telecnt, поставляемой с оборудованием Artolink. Общий поток данных Ethernet/Fast Ethernet передается по ССК, подключенному к первому порту ППМ. В ППМ поток данных поступает на плату интерфейса, где происходит его преобразование для передачи по оптическому каналу, либо коммутация на второй порт. Ко второму порту ППМ (технология Power over Ethernet) подключен радиомаршрутизатор «Рапира» в котором происходит преобразование потока данных Ethernet/Fast Ethernet в радиосигнал согласно стандарту IEEE 802.11.

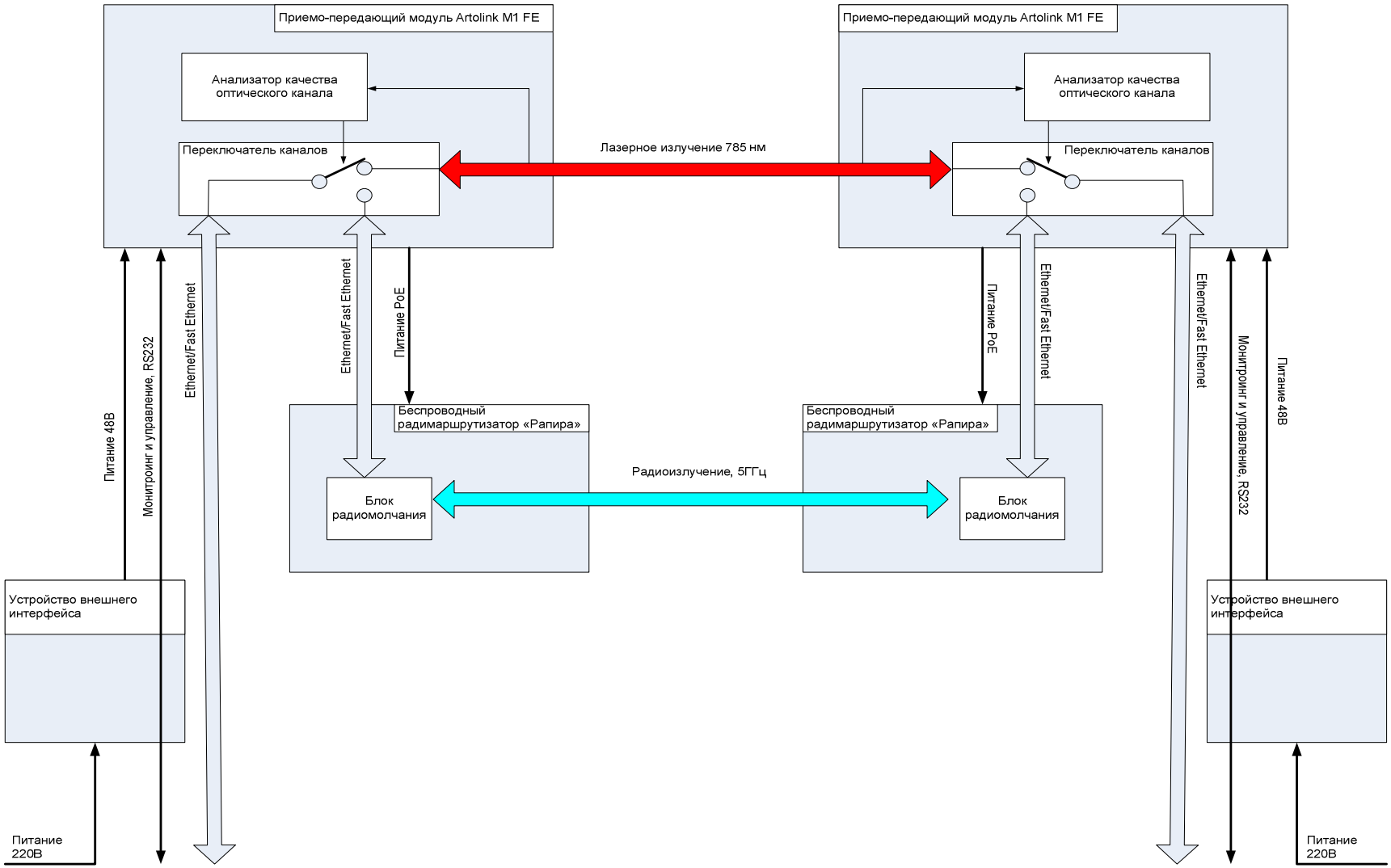

Рисунок 5.6. Функциональная схема аппаратно-программного комплекса гибридной линии связи

Интерфейсная плата ППМ содержит анализатор качества оптического канала, который управляет переключателем входного трафика, поступающего через порт 1. В случае отсутствия связи в течение 1секунды происходит перенаправление трафика на порт 2. Обратное перенаправление трафика в оптический канал происходит при безошибочной работе оптического канала в течение 10 секунд.

Необходимо отметить, что конфигурация, управление и мониторинг каналов лазера и радио может осуществляться одновременно с помощью персонального компьютера. При этом для канала лазера используется порт RS232, расположенный на модуле УВИ, а для канала радио используется Fast Ethernet порт 1, расположенный на модуле ППМ. Работа оператора с радиомаршрутизатором возможна с помощью стандартных web-браузеров или сетевых протоколов прикладного уровня SSH (Secure Shell) посредством ввода IP-адреса устройства.

В ходе проведенных испытаний аппаратно-программного комплекса сопряжения основного и резервного каналов в целях определения его работоспособности в целом, соответствия переключения каналов заданному алгоритму, а также проведения измерений, позволяющих оценить достигнутый уровень требуемых характеристик, был использован стенд, схема которого представлена на Рисунке 5.7.

В соответствии с данной схемой к гибридному каналу были подключены коммутатор и персональный компьютер. В качестве измерителя пропускной способности канала и уровня потерь в нем использовались два тестера Ethernet Etest, позволяющие создать информационный трафик полностью загружающий канал Fast Ethernet.

Для настройки, контроля и измерения параметров аппаратно-программного комплекса сопряжения основного и резервного каналов к персональному компьютеру подключаются по интерфейсу RS232 УВИ и ETest. Один ППМ подключается через порт 1 Fast Ethernet соединительным сигнальным кабелем (ССК) к коммутатору. Персональный компьютер и тестер ETest также подключены к коммутатору. Другой ППМ через порт1 Fast Ethernet подключен ко второму тестеру ETest посредством кабеля ССК.

К порту 2 (на обоих модулях ППМ) подключены беспроводные радиомаршрутизаторы.

Персональный компьютер обеспечивает мониторинг и управление оптическими и радиомодулями, а также управление тестерами и сбор статистики работы в процессе тестирования.

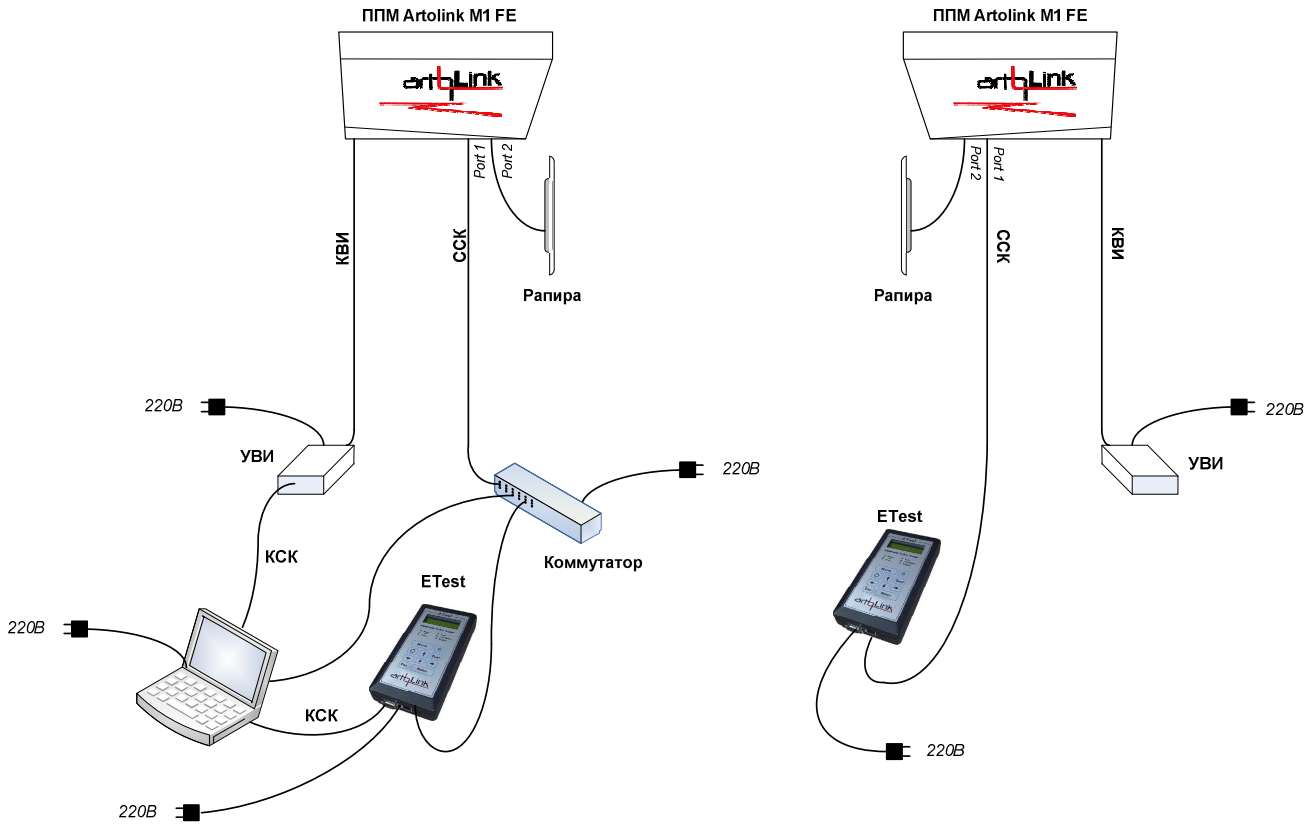

Рисунок 5.7. Испытательный стенд аппаратно-программного комплекса сопряжения основного и резервного каналов

Программа испытаний предусматривала 3 этапа:

1. Проверка работоспособности и измерение пропускной способности канала.
2. Проверка механизма переключения между каналами.
3. Измерение динамических характеристик переключения между каналами.

Результаты испытаний полностью подтвердили работоспособность и заданную пропускную способность обоих каналов.

Перекрытие оптического канала во всех случаях приводило к переключению на резервный радиоканал. Восстановление лазерного канала во всех случаях приводило к обратному переключению на основной лазерный канал.

Среднее значение времени перехода с оптического канала на радио составило 0,97 с, а с радиоканала на оптику – 0,1 с.

Расчет среднегодовой доступности канала Дсг с данными параметрами и с учетом среднегодового количества прерываний связи 146 (экспериментальное значение с учетом оценки верхней границы недоступности канала за год 5%) дает следующую оценку доступности гибридного канала:

$$Дсг=1-(0,97+0,1)*146/(365*24*3600)=0,999995$$

Заключение

В настоящей работе дан обзор зарубежной и отечественной научно-технической литературы по проблемам широкополосных и сверхширокополосных средств передачи мультимедийной информации. Проведена классификация зарубежных и отечественных динамично развивающихся стандартов и нормативно-технических документов, регламентирующих разработку и изготовление аппаратуры беспроводной связи. На основании проведенного анализа показано, что основным направлением развития беспроводной связи является расширение функциональных возможностей и резкое повышение производительности и надежности беспроводных сетей в связи с быстрым и непрерывно увеличивающимся объемом передаваемой мультимедийной информации.

Проведен анализ состояния и перспектив развития новейших технологий построения атмосферных оптических линий связи, радиорелейных средств в миллиметровом диапазоне радиоволн и каналов WiFi на базе протокола IEEE 802.11n. Показана актуальность и необходимость разработки отечественной аппаратуры гибридного канала превосходящего по характеристикам существующие аналоги, включающего основной (лазерный) канал со скоростью передачи информации до 10 Гбит/с и резервные каналы миллиметрового диапазона радиоволн (скорость до 5 Гбит/с) и WiFi канала (скорость до 300 Мбит/с).

Приведены методы расчета и выбора оптимальных параметров разрабатываемых гибридных каналов связи. Исследованы влияния шумов и помех на выбор параметров гибридной линии связи.

Показано, что разработка предлагаемой в проекте аппаратуры сверхвысокоскоростной и надежной гибридной линии связи обеспечит эффективное решение проблемы «последней мили» и возможность объединения базовых станций сетей WiMAX и сотовой связи LTE скоростными каналами связи.

Проведено исследование двух моделей гибридного канала передачи данных: модели с резервным радиоканалом (когда оптический канал и радиоканал используются поочередно – холодный резерв радиоканала) и модели с параллельным использованием радиоканала – горячий резерв радиоканала миллиметрового диапазона радиоволн. Построена и исследована модель с резервным радиоканалом в рамках теории массового обслуживания. Используется метод вложенных цепей Маркова. С помощью матрично-аналитического подхода получены стационарные вероятности состояний системы во

вложенные моменты. Также получено стационарное распределение состояний системы в произвольные моменты времени, приведены основные характеристики производительности. Представлена модель гибридного канала с параллельным использованием радиоканала. Получен критерий существования стационарного режима и получено стационарное распределение марковского процесса, описывающего состояния системы в произвольный момент времени, а также приведены основные характеристики производительности системы.

Разработан пакет прикладных программ, на базе которого проведен численный анализ вариантов построения гибридного канала передачи мультимедийной информации.

Описаны модели, реализованные в настоящей версии пакета программ, включая: аналитические и имитационные модели гибридной системы с холодным резервом (канал IEEE 802.11n); гибридная система с горячим резервом (радиоканал миллиметрового диапазона радиоволн); гибридный канал с двумя резервными радиоканалами, приведена высокоуровневая архитектура пакета программ и описание функциональных блоков: графический пользовательский интерфейс; консольный интерфейс; функциональные блоки для расчета математических и имитационных моделей; модуль управления; блок вспомогательного функционала. Рассмотрены вопросы отладки алгоритмов работы и их оптимизация с целью сокращения времени расчетов и моделирования. Приведено описание применения пакета программ, руководство пользователя и программиста.

Разработаны и исследованы механизмы и алгоритмы переключения, оказывающие влияние на производительность и надежность гибридной системы. Исследованы различные методы сглаживания колебаний уровня оптического сигнала, включая механизмы мощностного и временного гистерезиса, фильтрацию и т.д., предотвращающие частые операции по переключению каналов. Дано описание функционирования разработанного устройства переключения каналов. Осуществлен выбор оптимальных параметров для автоматического переключения режимов работы гибридного канала по следующим критериям работоспособности канала: отношение сигнал/шум; скорость передачи информации; частота приема/передачи ошибочных бит информации; соотношение продолжительности работы основного и резервного каналов. Проведен выбор элементной базы и разработана электронная схема интерфейсной платы.

Дано описание оригинальной архитектуры блока аппаратуры атмосферной оптической линии связи и резервной широкополосной радиолинии, а также аппаратно-программного комплекса сопряжения основного и резервного канала. Приведено обобщение результатов предыдущих этапов работ. Дана оценка полноты решения задач и их сравнение с современным научно-техническим уровнем.

Показано, что НИР выполнена на мировом уровне (в теоретической части превосходит мировой уровень).

Приведено описание программы внедрения результатов НИР в образовательный процесс в МФТИ на кафедре «Инфокоммуникационных систем и сетей».

Список использованных источников

1 Вишневский В., Портной С., Шахнович И. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G. – М.: Техносфера, 2009. – 470 с. – ISBN 978-5-94836-223-6.

2 F. Akyildiz, X. Wang. Wireless Mesh Networks. -- Chichester: John Wiley & Sons, 2009. – 324 p. – ISBN 978-0470-03256-5.

3 David T. Wong, Peng-Yong Kong, Ying-Chang Liang, Kee C. Chua. Wireless Broadband Networks. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2009. – 508 p. – ISBN 978-0470181775.

4 Savo G. Glisic. Advanced Wireless Networks: 4G Technologies. – Chichester: John Wiley & Sons, 2006. – 882 p. – ISBN 978-0470015933.

5 Вишневский В., Семенова О. Системы поллинга: теория и применение в широкополосных беспроводных сетях. – М.: Техносфера, 2007. – 312 с. – ISBN 978-5-94836-166-6.

6 H. Wu , M. Kavehrad. Availability Evaluation of Ground-to-Air Hybrid FSO/RF Links // International Journal of Wireless Information Networks. – Март 2007. – Т. 14, №1.

7 J. Derenick, C. Thorne, J. Spletzer. On the deployment of a hybrid free-space optic/radio frequency (FSO/RF) mobile ad-hoc network // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – Авг. 2005. – С. 3990-3996.

8 J. Derenick, C. Thorne, J. Spletzer. Hybrid Free-Space Optics/Radio Frequency (FSO/RF) Networks For Mobile Robot Teams // Multi-Robot Systems. From Swarms to Intelligent Automata. – 2005. – Т. 3. – С. 263-268. -- http://www.cse.lehigh.edu/~spletzer/publications/multibot05.pdf. – ISBN 978-1-4020-3388-9.

9 S. Bloom, W. S. Hartley. The Last-Mile Solution: Hybrid FSO Radio // White Paper, AirFiber, Inc. – May 2002. – http://www.systemsupportsolutions.com/whitepapers.htm.

10 Akbulut, M. Efe, A. M. Ceylan, F. Ari, Z. Telatar, H. Gokhan Ilk, S. Tugac. An Experimental Hybrid FSO/RF Communication System // Proceedings of the second IASTED International Conference on Communication Systems and Networks (CSN 2003), 8 Сент. - 10 Сент. 2003 – Benalmadena, 2003. – http://www.actapress.com/PaperInfo.aspx?PaperID=13974&reason=500.

11 Kim , E. Korevaar. Availability of Free Space Optics (FSO) and hybrid FSO/RF systems // Optical wireless communication IV, Aug. 2005. – 2005. – С. 84-95.

12 Sana, H. Erkan, S. Ahmed, M.A. Ali. Design and Performance of Hybrid FSO/RF architecture for Next Generation Broadband Access Networks // Proc. of SPIE, 2 Oct. 2006. – 2006. – Т. 6390.

13 Akbulut, A. Ilk, H.G. Ari, F. Design, availability and reliability analysis on an experimental outdoor FSO/RF communication system // 7th International Conference Transparent Optical Networks, 3 Jul.-7 Jul. 2005. – 2005. – Т. 1. – С. 403-406.

14 F. Nadeem., E. Leitgeb, M. Saeed Khan., M. Saleem Awan. Availability simulation of Switch over for FSO and mmW // IEEE International Conference on Information & Emerging Technologies 2007 (ICIET2007). – Karachi, 2007. – С. 95-99.

15 T. Kamalakis, I. Neokosmidis, A. Tsipouras ,T. Sphicopoulos, S. Pantazis, I. Andrikopoulos. Hybrid Free Space Optical/Millimeter Wave Outdoor Linksfor Broadband Wireless Access Networks // IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications PIMRC, Sept. 2007. – 2007. – С. 1-5.

16 F. Nadeem, M. Gebhart, E. Leitgeb, W. Kogler, M. S. Awan, M. S. Khan, G. Kandus. Simulations and analysis of bandwidth efficient switch-over between FSO and mmW links // SoftCOM, 25 Sept.-27 Sept. 2008. – Split-Dubrovnik, 2008. – С. 356-351.

17 F. Nadeem, B. Geiger, E. Leitgeb, M.S. Awan, G. Kandus. Evaluation of switch-over algorithms for hybrid FSO-WLAN systems // Wireless VITAE 2009. – С. 565-570. – ISBN 978-1-4244-4066-5.

18 Вишневский В.М., Семенова О.В. Об одной модели оценки производительности широкополосного гибридного канала связи на основе лазерной и радиотехнологий // Проблемы информатики. – Новосибирск, 2010. – №2 (6). – С. 43-58.

19 Шаров С.Ю., Семенова О.В. Имитационная модель беспроводного канала связи на основе лазерной и радио технологий // Труды 14-й Международной Конференции по Распределенным Вычислительным Системам и Сетям. – М., 2010. – С. 368-374.

20 Derenick J., Thorne C., Spletzer J. On the deployment of a hybrid free- space optic/radio frequency (FSO/RF) mobile ad-hoc networks // Con- ference proceeding, Intelligent Robots and Systems. – 2005. – С. 3990–3996.

21 Wang D., Abouzeid A.A. Throughput Capacity of hybrid radio-frequency and free-spaceoptical (RF/FSO) multi-hop networks // Information Theory and Applications Worshop, 29 Jan.-2 Feb. 2007. – La Jolla, 2007. –- С. 3-10. – ISBN 978-0-615-15314-8.

22 Nadeem F., Leitgeb E., Kvicera V., Grabner M., Awan M.S., Kandus G. Simulation and analysis of FSO/RF switch over for different armospheric effects // International Conference ConTEL. – 2009. – С. 39–43.

23 Letzepis N., Nguyen K.D., Guillen i Fabregas A., Cowley W.G. Outage analysis of the hybrid free-space optical and radio-frequency channel // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2009. – №27, Вып. 9. – С. 1709–1719.

24 Lehpamer, H. Microwave Point-to-Point Systems in 4G Wireless Networks and Beyond. – http://www.cicusa.com/mainwebdocs/Microwave_PTP_Systems.pdf.

25 Lehpamer, H. Millimeter-Wave Radios in Backhaul Networks. – http://www.cicusa.com/mainwebdocs/MMW_Radios_in_Backhaul.pdf.

26 Lehpamer, H. Microwave Transmission Networks: Planning, Design, and Deployment. – 2nd ed. – McGraw-Hill, 2010. – 496 с. – ISBN 978-0-07-170122-8.

27 Frigyes, I., Csurgai-Horvath, L. From Gigabit to Multi-Gigabit: mm Waves in Mobile Networks' Backhaul // IEEE Global Communications Conference, Exhibition & Industry Forum 2009 (GLOBECOM2009) Workshops, Nov. 30-Dec. 4 2009. – Honolulu, 2009.

28 Madhow, U. Broadband millimeter wave networks: Architectures and applications // 2nd International Symposium on Advanced Networks and Telecommunication Systems 2008 (ANTS'08), 15-17 Dec. 2008. – Mumbai, 2008.

29 Kosugi, T., Hirata, A., Nagatsuma, T., Kado, Y. MM-wave long-range wireless systems // IEEE Microwave Magazine. – 2009. – Т. 10, №2. – С. 68-76.

30 Dyadyuk, V., Bunton, J.D., Guo, Y.J. Study on high rate long range wireless communications in the 71–76 and 81–86 GHz bands // European Microwave Conference 2009 (EuMC'2009), Sept. 29-Oct. 1 2009. – Rome, 2009.31. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput. – IEEE Std., 2009.

31 Flecker B., Gebhart M., Leitgeb E., Sheikh Muhammad S., Chlestil C. Results of attenuation measurements for Optical Wireless Channel under dense fog conditions regarding different wavelengths // Proc. Of SPIE. 2006. Vol. 6306. P. 1-11.

32 Вишневский В., Кузнецов С., Лаконцев Д., Поляков С. Гибридное оборудование на базе радио- и лазерной технологий // Первая миля. 2007. № 1. http://www.moctkom.ru/articles/article7/article7.htm

33 Казимирский А. В. Методика аппроксимации MAP-потоков при помощи MAP-потоков второго порядка // Информационные системы и технологии (IST'2002): Материалы I международной конференции, Минск: БГУ, 2002. Дополнение. С. 27-31.

34 Зеленюк Ю.И., Огнев И.В., Поляков С.Ю., Широбакин С.Е. Влияние погодных условий на надежность атмосферной оптической связи // Вестник связи. 2002. №4.

35 Grassmann W., Heyman D. Equlibrium distribution of block-structured Markov chains with repeated rows // Journal of Applied Probability. 1990. Vol. 27. P. 57-576.

36 Kemeni J., Snell J., Knapp A. Denumerable Markov chains. New York: Van Nostrand, 1966. 348 p.

37 Breuer L., Dudin A.N., Klimenok V.I. A retrial BMAP/PH/1 system // Queueing Systems. 2002. Vol. 40. P. 433-457.

38 Ramaswami V.A. A stable recursion for the steady state vector in Markov chains of M/G/1 type // Commun. Statist.-Stochastic Models. 1988. Vol. 4. P. 83-188.

39 Dudin A., Semenova O. Stable algorithm for stationary distribution calculation for a BMAP/SM/1 queueing system with Markovian arrival input of disasters // Journal of Applied Probability. 2004. Vol. 42. No. 2. P. 547-556.

40 Семенова О.В. Устойчивый алгоритм расчета стационарного распределения системы обслуживания BMAP|SM|1 с марковским потоком сбоев и двумя режимами работы // Автоматика и вычислительная техника. 2004. № 1. С. 75-84.

41 Cinlar E. Introduction to stochastic processes. New Jersey: Prentice-Hall, 1975. 400 p.

42 Fricker C., Jaibi R. Monotonicity and stability of periodic polling models // Queueing Systems. 1994. Vol. 15. P. 211-238.

43 Neuts M. Matrix-geometric solutions in stochastic models. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 1981. 332 p.

44 Вишневский В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. М: Техносфера, 2003.

45 Vishnevskiy V., Semenova O. Queueing System with Alternating Service Rates for Free Space Optics-Radio Hybrid Channel // MACOM 2010.

46 Шаров С.Ю., Семенова О.В. Имитационная модель беспроводного канала связи на основе лазерной и радио технологий // Distributed Computer and Communication Networks. Theory and Applications (DCCN-2010). С. 368-374.

47 Вишневский В.М., Шахнович И.В., Фролов С.А. Радиорелейные линии связи в миллиметровом диапазоне радиоволн // Электроника. - 2011. - № 1. - С. 90 - 98.

48 Wong D., Abouzeida A.A. Throughput and delay analysis for hybrid radio fregnency and free-space-optical (RF/FSO) networks // Journal Wireless Network. 2011. Vol. 17. P. 877 – 892.

49 Chatzidiamantis N.D., Karagiannidis G.K., Kriazis E.E., Matthaion M. Diversity combining in hybrid RF/FSO system with PSK modulation // Proc. of IEEE ICC 2011. P. 213 – 221.

50 Eslami A., Vangala S., Pisho-Nik H. Hybrid channel codes for efficient FSO/RF communication systems // IEEE Transactions on Communications. 2010.

51Вишневский В. М., Семенова О. В., Шаров С. Ю. Моделирование и анализ гибридного канала связи на базе лазерной и радио технологий / Управление большими системами. Выпуск 35. М.: ИПУ РАН, 2011. С.237-249.

52 V.M.Vishnevskii, O.V.Semenova, S.Yu.Sharov. Modeling and Analysis of a Hybrid Communication Channel Based on Free-space Optical and Radio-frequency Technologies. Automation and Remote Control, 2013, Vol. 72, pp. 345-352.

53 Заявка № 2011128081 от 08.07.2011г. на патент на изобретение «Многоканальная система передачи информации повышенной надежности на базе лазерной и радио технологий»

54 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 20122611411 «Программный комплекс аналитического и машинного (имитационного) моделирования гибридного канала связи», зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 06.02.2012г.

55 Ю.А. Дмитриев, А. В. Клецов. Определение разности времен прихода хаотического радиоимпульса в два приемника на основе кросскорреляции его огибающих. // Радиотехника и электроника. - 2011. - Т. 56, N 6. - С. 712-718.

56 Ю.А. Дмитриев, Л.В. Кузьмин. Прием хаотических сигналов с использованием опорного генератора хаоса. // Журнал Радиоэлектроники. – 2012. № 1, 11 стр.

57 Vinel A. 3GPP LTE versus IEEE 802.11p/WAVE: which technology is able to support cooperative vehicular safety applications? // IEEE Wireless Communications Letters, Vol. 1, Issue 2, Apr. 2012, pp. 125–128.