

На правах рукописи



**Лукьянов Олег Викторович**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ОПТИКО-  
ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ПОЛИГОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО  
КОМПЛЕКСА**

Специальность 05.13.12 – Системы автоматизации проектирования  
(технические системы)

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Рязань – 2014

Работа выполнена на кафедре «Системы автоматизированного проектирования вычислительных средств» ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» (ФГБОУ ВПО «РГРТУ»).

**Научный**

**Шибанов Александр Петрович**

**руководитель:**

доктор технических наук, профессор кафедры САПР ВС ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет», г. Рязань

**Официальные**

**Леохин Юрий Львович**

**оппоненты:**

доктор технических наук, профессор кафедры информационно-коммуникационных технологий Московского института электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», г. Москва

**Мойбенко Виктор Иванович**

кандидат технических наук, заместитель начальника отдела, главный конструктор ОП ОАО «Корпорация «Фазотрон» - НИИР», НИИ «Рассвет», г. Рязань

**Ведущая  
организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)», г. Самара

Защита состоится **16 декабря 2014 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета Д212.211.02 в ФГБОУ ВПО «РГРТУ» по адресу: **390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «РГРТУ» и на сайте университета [www.rsgeu.ru](http://www.rsgeu.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

канд. техн. наук, доцент



Д.А. Перепелкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Измерительные комплексы нового поколения для передачи траекторной информации (ТИ) от оптико-электронных средств (ОЭС) об испытаниях летательных аппаратов (ЛА) должны обеспечивать передачу трафика от множества объектов летных испытаний (ЛИ): ракет, беспилотных летательных аппаратов, самолетов и т. п. Этот класс объектов ЛИ может быстро менять свои координаты в пространстве, динамически изменяя профили трафика в трактах передачи оптико-электронной информации (ОЭИ) и сигнальной информации (СИ). На ряд объектов может передаваться управляющая информация, например на самоликвидацию при аварийной ситуации или на изменение траектории полета. Другим классом источников информации являются ОЭС, которые осуществляют сопровождение ЛА. Из-за ограниченной дальности сопровождения ОЭС они должны передавать его друг другу по трассе полета. Кроме того, могут возникать нештатные ситуации, например срывы сопровождения отдельных ОЭС (по дальности, по углу места). В этом случае, те ОЭС, которые сопровождают данный объект в штатном режиме, обязаны передать целеуказания своим соседям, «потерявшим» объект для повторного «захвата» и дальнейшего сопровождения. Такие команды должны иметь приоритет и передаваться гарантированно за минимальное время. В настоящее время осуществлен переход от радиотехнических средств траекторных измерений, имеющих невысокую точность, к системам ГЛОНАС и GPS, системам на основе ОЭИ и СИ в различных диапазонах, например в инфракрасном, а также к лазерным системам сопровождения.

Особенностью ОЭС нового поколения является выдача видеоизображений объектов ЛИ и их фрагментов, факелов от двигателей, областей ионизации у корпусов летательных аппаратов и т. д. Обработка нескольких изображений (с выделением характерных областей и точек) от разных систем измерения с целью уточнения координат траектории идет в реальном времени. Процесс передачи разнообразной ОЭИ характеризуется резким увеличением объема такого трафика. Объекты ЛИ быстро уходят из зоны видимости и к сопровождению должны оперативно подключаться другие станции, расположенные вдоль трассы полета. Это приводит к скачкам трафика в сети передачи данных (СПД).

К СПД ОЭС нового поколения предъявляются повышенные требования по задержкам передачи, надежности и отказоустойчивости при динамически изменяющихся потоках трафика. В рамках традиционных подходов эта задача не решается. Сейчас в сетях общего назначения внедряется концепция программно определяемых сетей (SDN) в реализации стандарта OpenFlow. Их появление можно связать с проектами исследовательских групп Стэнфордского и Принстонского университетов, из которых следует отметить Jennifer Rexford, Jiayue He, Martin Suchara, Ma'ayan Bresler, Mung Chiang, F.P. Kelly, A. Maulloo, D. Tan, S.H. Low и др. В разработку методов и алгоритмов управления многопоточковым трафиком внести заметный вклад Вишневецкий В.М., Корячко В.П., Ляхов А.И., Башарин Г.П., Бочаров П.П., Коган Я.А., Захаров Г.П. и многие другие.

Интеллектуализация сетей с многопоточковой маршрутизацией создают основу для построения, как сетей общего назначения, так и специализированных сетей. Однако технология SDN находится в начальной стадии становления, и в России практически не используется. Для разработок сетей передачи ОЭИ с использованием концепции SDN требуется решение ряда научных проблем с применением автоматизированного проектирования. Поэтому задача, поставленная в диссертационной работе, является *актуальной*.

Актуальность темы диссертации подтверждается тем, что она выполнялась при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в форме грантов 11-07-00121-а «Методы автоматизированного проектирования, моделирования и сопровождения широкополосного Интернет G4 на основе развития теории GERT-сетей и генетических алгоритмов» (2011 г. – 2013 г.) и 14-07-00106-а «Методы автоматизированного проектирования перспективной сети передачи данных полигонного измерительного комплекса» (2014 г.).

**Соответствие паспорту специальности.** Диссертационная работа выполнена по специальностям 05.13.12 – «Системы автоматизации проектирования» (технические системы) и 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Содержанием специальности 05.13.12 является создание и повышение эффективности функционирования систем автоматизированного проектирования, управления качеством проектных работ на основе использования современных методов моделирования и инженерного анализа, перехода на безбумажные сетевые формы документооборота и интеграции САПР в общую архитектуру автоматизированной проектно-производственной среды. Присутствуют оригинальные результаты одновременно из трех областей исследований: 1) методология автоматизированного проектирования в технике, включая постановку, формализацию и типизацию проектных процедур и процессов проектирования, вопросы выбора методов и средств для применения в САПР; 2) разработка научных основ создания систем автоматизации проектирования и автоматизации технологической подготовки производства (САПР и АСТПП); разработка научных основ построения средств САПР, разработка и исследование моделей, алгоритмов и методов для синтеза и анализа проектных решений, включая конструкторские и технологические решения в САПР и АСТПП. Содержанием специальности 05.13.18 является разработка фундаментальных основ и применение математического моделирования, численных методов и комплексов программ для решения научных и технических, фундаментальных и прикладных проблем. Присутствуют оригинальные результаты одновременно из трех областей исследований: 1) разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений; 2) развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей; 3) реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

**Целью работы** является сокращение сроков проектирования, уменьшение материальных затрат и разработка методов определения структуры базовых опорных магистралей полигонного измерительного комплекса (ПИК) для передачи ОЭИ с распределением сеансовой абонентской нагрузки по параллельным путям передачи.

Должно быть разработано математическое и программное обеспечение для:

- проектирования архитектуры построения базовой опорной сети передачи ОЭИ;
- организации сеансовых виртуальных соединений в СПД ОЭС;
- оценки вероятностно-временных характеристик и надежности функционирования агрегированного базового канала, являющегося основой построения СПД ОЭС;
- проектирования ядра СПД, обеспечивающего передачу ОЭИ и СИ в режиме «репортаж» (в реальном времени) от объектов ЛИ на вычислительные центры (ВЦ), стартовые позиции, измерительные пункты (ИП) по трассе полета, в зоны приземления и т. п.;
- разработки методики автоматизированного проектирования сетей доступа ПИК.

### **Задачи исследований:**

1. Разработка методов создания базового опорного канала с повышенными характеристиками по надежности и времени передачи потоковой ОЭИ, предназначенного для построения как опорной СПД ОЭС, так сетей доступа.

2. Разработка методов повышения качества каналов ОЭИ и СИ на основе выявления параллелизма протокола передачи и корректировки его параметров.

3. Разработка методов планирования периода занятости канала передачи ОЭИ за счет выявления параллелизма протокола передачи и корректировки его параметров.

4. Разработка метода планирования длительностей периода передачи ОЭИ реального времени и периода передачи неприоритетной ОЭИ и СИ на основе выявления параллелизма протокола передачи и корректировки его параметров.

5. Разработка методов, алгоритмов и программ синтеза канальной структуры полигона при передаче трафика ОЭИ с жесткими требованиями по задержкам пакетов и потоков, а также их вариациям в условиях перемещения объектов ЛИ.

**Методы исследования.** Теоретические положения, выводы и экспериментальные результаты диссертационной работы, получены с использованием численных методов расчета плотностей и функций распределения выходных величин GERT-сетей, теории вероятностей, теории аналитических функций комплексного переменного, теории массового обслуживания, теории имитационного моделирования, генетических алгоритмов.

**Научная новизна.** В диссертации содержится решение актуальной научной задачи разработки математического обеспечения для автоматизированного проектирования сетей передачи оптико-электронной и сигнальной информации, имеющей существенное значение для сокращения сроков, уменьшения материальных затрат и повышения качества проектирования высокоскоростных участков сети передачи данных с повышенными требованиями по производительности и надежности. Получены новые результаты.

1. Модель передачи оптико-электронной и сигнальной информации по базовому агрегированному каналу полигонной сети с нахождением *распределения вероятностей* времени передачи *потока* в отличие от прототипов, в которых находится только дисперсия времени передачи *кадра* по неагрегированному каналу.

2. Метод улучшения вероятностно-временных характеристик сети передачи оптико-электронной и сигнальной информации на основе разложения протокола на параллельные компоненты и выравнивания времени их исполнения.

3. Метод уточнения длины периода занятости сети передачи оптико-электронной и сигнальной информации за счет выявления параллелизма протокола и выравнивания времени передачи пакетов по различным путям.

4. Метод улучшения показателей качества сети передачи оптико-электронной и сигнальной информации с агрегированием каналов и разделением трафика на профили.

5. Методика автоматизированного проектирования полигонной сети в режиме «репортаж», при передаче трафика оптико-электронной и сигнальной информации, изменяющегося в зависимости от траектории летательных аппаратов.

**Основные положения, выносимые на защиту.** На защиту выносятся следующие результаты диссертационной работы:

1. Модель передачи оптико-электронной и сигнальной информации по базовому агрегированному каналу с нахождением *распределения вероятностей* времени передачи *потока* в отличие от прототипов, в которых находится только дисперсия времени передачи *кадра* по каналу между оконечными маршрутизаторами суммированием дисперсий времени передачи по отдельным каналам.

2. Метод улучшения временных показателей качества сети передачи оптико-электронной и сигнальной информации на основе разложения GERT-сети протокола пе-

редачи на параллельные компоненты и выравнивания времени их прохождения с использованием системы массового обслуживания  $M/G/1$ .

3. Метод уточнения длины периода занятости сети передачи опτικο-электронной и сигнальной информации на основе разложения GERT-сети протокола передачи на параллельные компоненты и использования системы массового обслуживания  $M/G/1$ .

4. Метод улучшения показателей качества сети передачи опτικο-электронной и сигнальной информации с разделением трафика на синхронный и асинхронный на основе разложения GERT-сети протокола передачи на параллельные компоненты с корректировкой характеристик операций, а также расчетов периода занятости СМО  $M/G/1$  с перерывами.

5. Методика автоматизированного проектирования сети передачи опτικο-электронной и сигнальной информации в режиме «репортаж», основанная на построении параллельных двухфазовых путей между оконечными маршрутизаторами и применении генетических алгоритмов для максимизации резервов полосы пропускания виртуальных каналов.

**Достоверность** научных положений определяется:

- корректностью полученных математических результатов;
- сравнением точности результатов, полученных численными методами и на основе теории аналитических функций;
- сравнением результатов, полученных аналитическими методами и на основе имитационного моделирования;
- сравнением рассчитанных на основе разработанных автором методов резервов полосы пропускания сетевых каналов с характеристиками реальных каналов.

**Практическая значимость работы.** На основе полученных научных результатов созданы инженерные методики и программные средства автоматизированного проектирования сетей передачи опτικο-электронной и сигнальной информации. Гибкость и универсальность разработанных методов и инструментальных программных средств делает возможным их применение в следующих областях:

- для построения системы передачи опτικο-электронной и сигнальной информации в режиме «репортаж» с трассы полета с использованием космического сегмента сети;
- в наиболее ответственных доменах магистральных сетей полигонов с производительностью в десятки, сотни Гбит/ и более;
- в сетях доступа полигонов с применением базового агрегированного канала;
- при создании систем различного назначения для управления особо опасными объектами, например, химическими производствами, атомными электростанциями, крупными энергосетями, непрерывными производствами и т. п.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на 9 всероссийских и международных конференциях и семинарах, в том числе на в том числе на 18-й Всероссийской научно-технической конференции «Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании», Рязань, 2013; II Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники», Самара, 2011; отраслевой научно-технической конференции приборостроительных организаций Роскосмоса "Информационно-управляющие и измерительные системы-2012", г. Королев, 2012; XI Всероссийской конференции по проблемам новых технологий, посвященной 90-летию со дня рождения академика В.П. Макеева, г. Миасс, Челябинской обл., 2014 г.

**Публикации.** По итогам исследований опубликовано 17 работ, в том числе 4 статьи в перечне ВАК РФ рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования ос-

новых научных результатов диссертаций – «Системы управления и информационные технологии», «Вестник РГРТУ», «Успехи современной радиоэлектроники».

Опубликовано 9 материалов докладов международных и всероссийских конференций и семинаров; опубликовано 1 статья в межвузовском сборнике Рязанского государственного радиотехнического университета.

#### **Реализация и внедрение результатов работы.**

Исследования по тематике диссертационной работы проводились в рамках фундаментальных исследований и отражены в 3 отчетах по гранту 11-07-00121-а Российского фонда фундаментальных исследований.

Результаты исследований внедрены в филиале ОАО «РКЦ «Прогресс» - ОКБ «Спектр» при проведении предварительного проектирования перспективных образцов системы сбора, передачи и обработки оптико-электронной и сигнальной информации, поступающей в реальном времени от измерительных систем полигона.

Копии актов о внедрении результатов диссертационной работы приведены в Приложении.

**Структура работы.** Диссертация содержит 169 страниц основного текста и состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 108 наименований и 2 приложений на 20 страницах. В диссертацию включено 66 рисунков и 17 таблиц.

**В главе 1** рассмотрены тенденции развития СПД ОЭС полигонного измерительного комплекса (ПИК). ОЭС измерений нашли широкое применение при проведении летных испытаний ЛИ объектов ракетно-космической техники (РКТ). Применение ОЭС, особенно на начальном участке траектории, оправдано тем, что другими способами невозможно обеспечить требуемые точности определения параметров изделий РКТ. ОЭС делятся на два класса: пассивные и активные измерители. Пассивные измерители воспринимают излучение объекта наблюдения (ОН) в различных спектральных диапазонах и, как правило, являются средствами пеленгационного типа. Активные ОЭС, например лазерные измерители дальности (лидары), облучают объект сигналами определенных частот и по отраженному сигналу измеряют дальности путем определения либо задержки отраженного сигнала, либо изменения его фазы.

СИ (включая спектрометрические, отражательные и излучательные характеристики объекта) необходимы для оценки качества тепловых защит, функционирования двигательной установки, оценки подобия боевых и ложных элементов оснащения и т.п. СИ может обеспечить обнаружение предаварийного состояния двигательной установки (ДУ) или других элементов конструкции ракет носителей или космических аппаратов, излучающих энергию в различных спектральных диапазонах, начиная от ультрафиолетового и кончая дальним ИК-диапазоном. Дистанционный тепловой контроль изделия должен работать как с тепловым полем корпуса изделия на стартовой позиции, так и с факелом ДУ на начальном участке траектории с целью определения отклонений в работе ДУ по состоянию и положению теплового поля факела. Работа по факелу накладывает дополнительные требования по диапазону измеряемых температур ИК-средств, который значительно расширяется (до 2000° С), по дальности действия системы, по реализации автоматического углового перемещения оптической оси камер по азимуту и углу места и по синхронизации изображений при перемещении изделия по траектории полета.

Данные ОЭС это – полууголовое изображение, как правило, цифровое, объекта и окружающей его фоновой обстановки, полученное в определенном спектральном диапазоне. Каждый элемент изображения имеет определенную яркость (амплитуду), представляющую собой СИ, а координаты этого элемента на изображении с учетом положения оптической оси объектива являются элементами ТИ, т. к. они фактически характеризуют угловое положение этого элемента в обозреваемом пространстве

относительно точки стояния ОЭС. Таким образом, ТИ и СИ в данных ОЭС неразделимы без определенной обработки. Для определения линейных координат объекта помимо обработки по разделению ТИ и СИ необходимо использовать данные двух ОЭС, удаленных друг от друга на известное расстояние, измеренное с высокой точностью. При оснащении ОЭС лазерным дальномером необходимость во второй системе отпадает.

Разделение ТИ и СИ на изображении, полученном ОЭС, осуществляется с учетом того, что объект ЛИ движется на фоне неподвижной или мало подвижной окружающей обстановки, и это движение проявляется как в изменении координат изображения объекта ЛИ, так и в изменении яркости и размеров его изображения.

Для пространственно-протяженных изображений объектов, содержащих более одного элемента, определяют угловые координаты характерной точки, к которой можно отнести центр тяжести яркостей элементов изображения объекта, его геометрический центр, центр следящего строка и т.п. В зависимости от выбранной характерной точки обработке по алгоритмам обнаружения подвергается либо полутоновое изображение, либо бинарное, требующее меньших затрат, но уступающее по точности измерения координат.

Использование ОЭС требует пересмотра распределения функций между измерительной станцией и центром обработки. Большой объем и высокая интенсивность потока данных требует больших затрат на передачу информации, а также новых проектных решений для создания сети передачи данных от ОЭС. В настоящее время специалисты сетевой индустрии связывают повышение показателей качества передачи информации с программно определяемыми сетями SDN и, в частности, с алгоритмом сетевого управления многопоточным трафиком TRUMP (*Traffic-management using multipath protocol*). TRUMP-алгоритм представляется в виде используемых при оптимизации обновлений:

$$\text{цена обновления обратной связи: } s_l(t+1) = p_l(t+1) + q_l(t+1);$$

$$\text{цена обновления потерь: } p_l(t+1) = \left[ p_l(t) - \beta_p \left( c_l - \sum_i \sum_j H_{lj}^i z_j^i(t) \right) \right]^+;$$

$$\text{цена обновления задержки: } q_l(t+1) = w f' \left( \sum_i \sum_j H_{lj}^i z_j^i / c_l \right);$$

$$\text{обновление путь-скорость } z_j^i(t+1) = \underset{z_j^i}{\text{maximize}} U_i \left( \sum_j z_j^i \right) - \sum_l s_l(t) \sum_j H_{lj}^i z_j^i,$$

где  $l$  – номер линии,  $z_j^i$  – скорость передачи из источника  $i$  на  $j$ -м пути,  $U_i$  – мера полезности источника  $i$ ,  $s_l$  – нагрузка на линии  $l$ ,  $c_l$  – мощность линии  $l$ ,

$$H_{lj}^i = \begin{cases} 1, & \text{если путь } j \text{ из источника } i \text{ использует линию } l, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Сходимость и оптимальность протокола не гарантированы теорией оптимизации. TRUMP использует явные обратные связи между источниками и промежуточными узлами, требует знания из конца в конец нескольких путей. При использовании TRUMP для передачи ОЭИ и СИ затраты на обратную связь могут оказаться неприемлемыми.

**Во второй главе** предлагаются модели передачи ОЭИ по агрегированному каналу с целью увеличения производительности и повышения надежности ПИК. Входная инфор-

мация поступает в виде *кадров измерений* (КИ). Кадр делится на отдельные *пакеты*, которые могут передаваться по параллельно и согласованно по разным каналам. Совокупность КИ, передаваемых без интервалов, составляет входной *поток* информации.

Гистограммы времени передачи пакетов аппроксимируются нормированным распределением Эрланга с добавлением постоянной составляющей длительности передачи. Задержка прохождения пакета по каналу равна  $t = T \pm \xi$ , где  $T$  – постоянная составляющая, а  $\xi$  переменная величина, определяющая «джиттер» – отклонение времени передачи от среднего значения. Плотность нормированного распределения Эрланга  $f_k(\xi) = k\mu(k\mu\xi)^{k-1} e^{-k\mu\xi} / (k-1)!$  Для моделирования изменения задержки пакетов в больших пределах используются значения  $\mu$  в интервале  $(0,1-2)$ , что хорошо согласуется с измерениями задержек в реальных каналах.

Получена производящая функция моментов (п.ф.м.) времени передачи КИ

$$\tilde{M}_t(s) = 8\mu^2 e^{sT} \left[ (2\mu - s)^{-2} - (4\mu - s)^{-2} - 4\mu(4\mu - s)^{-3} \right].$$

Найдены характеристики СПД при передаче КИ с учетом коэффициента готовности канала  $q$ . Среднее время передачи кадра и его дисперсия соответственно равны:

$$\bar{t} = 2Q_1(T + 1/\mu) + Q_2(T + 11/8\mu);$$

$$\sigma_b^2 = 2Q_1 \left( 4T^2 + \frac{8T}{\mu} + \frac{5}{\mu^2} \right) + Q_2 \left( T^2 + \frac{11T}{4\mu} + \frac{39}{16\mu^2} \right) - \left[ 2Q_1 \left( T + \frac{1}{\mu} \right) + Q_2 \left( T + \frac{11}{8\mu} \right) \right]^2,$$

$$Q_1 = 2(1-q)/(2-q) \quad Q_2 = q/(2-q).$$

*Расчет плотности распределения времени (п.р.в.) передачи кадра через базовый канал.* Время передачи по одному каналу кадра из 2 пакетов, находится по п.ф.м.  $M(s) = e^{2sT} (2\mu)^4 / (2\mu - s)^4$  с заменой  $z = -s$ . Функция  $\Phi(z) = e^{-2sT} (2\mu)^4 / (2\mu + z)^4$  равномерно сходится к нулю относительно  $\arg z$  при  $|z| \rightarrow \infty$ . Имеется полюс четвертой кратности в точке  $z = -2\mu$ . Функция  $\Phi(z)$  при  $\text{Re } z < 0$  удовлетворяет условиям леммы Жордана, поэтому интеграл, взятый вдоль контура Бромвича, равен сумме вычетов функции  $\Phi(z)$  относительно всех ее особенностей. Тогда п.р.в. времени передачи кадра

по каналу  $f(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{-i\infty}^{i\infty} e^{zt} \Phi(z) dz = \sum_{k=1}^n \text{Res} \left[ e^{zt} \Phi(z) \right]$ . П.р.в. времени передачи пакета

$f(t) = \frac{1}{(n-1)!} \lim_{z \rightarrow z_k} \frac{d^{n-1} \left[ (z - z_k)^n e^{zt} \Phi(z) \right]}{dz^{n-1}} = \frac{8\mu^2}{3} (t-T)^3 e^{-2\mu(t-2T)}, t \geq 2T$ . При работе 2-х

каналов  $\tilde{f}(t) = 8\mu^2 (t-T) e^{-2\mu(t-T)} \left\{ 1 - e^{-2\mu(t-T)} [1 + 2\mu(t-T)] \right\}, t > T$ . Вероятностная смесь случайных величин определяет искомую п.р.в. времени передачи кадра по агрегированному каналу

$$f_{\text{кадра}}(t) = Q_1 f(t) + Q_2 \tilde{f}(t) = \frac{2(1-q)}{2-q} \cdot \frac{8\mu^2}{3} (t-T)^3 e^{-2\mu(t-2T)} + \frac{q}{2-q} \cdot 8\mu^2 (t-T) e^{-2\mu(t-T)} \left\{ 1 - e^{-2\mu(t-T)} [1 + 2\mu(t-T)] \right\}, t > T.$$

При случайном числе передаваемых в потоке КИ, заданном *дискретным* распределением с производящей функцией (п.ф.)  $A(s) = \sum_{i=0}^k p_i s^i$ ,  $\sum_{i=0}^k p_i = 1$ , время передачи потока определяется нахождением суммы случайного числа независимых случайных величин  $\xi_1, \xi_2, \dots$  с одним и тем же распределением  $F$  и п.ф.м. времени передачи КИ  $M(s)$ .

Найдена п.ф.м. времени передачи потока  $\omega(s) = \sum_{i=1}^k p_i \left\{ 8\mu^2 e^{sT} \left[ \frac{1}{(2\mu-s)^2} + \frac{8\mu-s}{(4\mu-s)^3} \right] \right\}^i$ .

Если число КИ в потоке задано *распределением Пуассона*, то

$\omega(s) = \exp \left[ \lambda \left( 8\mu^2 e^{sT} \left[ \frac{1}{(2\mu-s)^2} + \frac{8\mu-s}{(4\mu-s)^3} \right] - 1 \right) \right]$ . По полученным выражениям находят

характеристические функции времени передачи потока КИ, что необходимо для численного расчета соответствующей п.р.в. методом эквивалентных упрощающих преобразований GERT-сети.

Произведен расчет *тракта СПД ОЭС с защитой 1+1*. КИ могут передаваться по каналу СПД ОЭС ПИК, состоящему из защищаемого и защищающего каналов (рисунок 1).

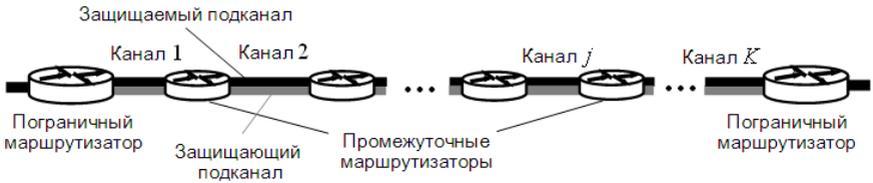


Рис. 1. Тракт передачи КИ между оконечными маршрутизаторами

Путь (тракт) маршрутизации прокладывается между пограничными маршрутизаторами. Резервирование канала осуществляется по схеме 1+1 как показано на рисунке 2.



Рис. 2. Блок-схема работы агрегированного канала

Если п.ф. числа КИ в потоке  $A(s) = \sum_{j=1}^m p_j s^j$ , то п.ф.м. времени передачи потока по

тракту  $\omega(s) = \sum_{j=1}^m p_j \left[ \prod_{i=1}^n M_{Ei}(s) \right]^j$ ,  $\sum_{j=1}^m p_j = 1$ . По этому выражению методом эквивалент-

ных упрощающих преобразований находится п.р.в. времени передачи потока по тракту между оконечными маршрутизаторами, а также среднее время передачи и его дисперсия, необходимые для формирования функции полезности генетического алгоритма.

Для  $\mu = 0,1; 0,175; 0,25; 0,5; 1; 2$  и типичного значения постоянной составляющей задержки в канале  $T = 5$  мс построены зависимости среднего времени передачи КИ по агрегированному каналу и его дисперсии в зависимости от коэффициента готовности  $q$ .

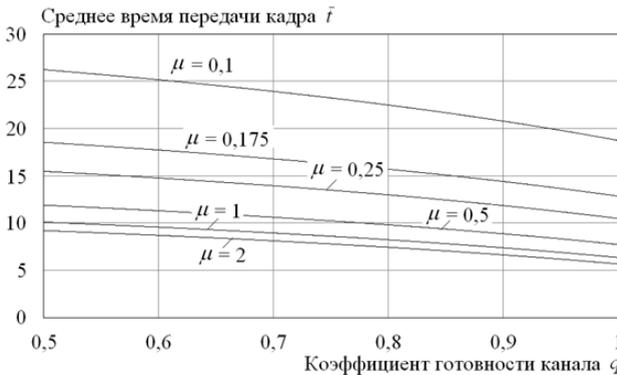


Рис. 3. Зависимость среднего времени передачи кадра от коэффициента готовности канала

Из рисунка 3 видно, что агрегирование канала позволило обеспечить незначительное изменение среднего времени передачи КИ в широком диапазоне изменения коэффициента готовности

(от 0,5 до значений, близких к 1). Для обеспечения минимальной дисперсии (приемлемых значений интервала «трех сигм») надо стремиться к значениям  $\mu$  в пределах от 1 до 2, что обеспечивает коэффициент готовности канала порядка 0,995.

В третьей главе рассматриваются методы оптимизации базовых вариантов СПД ОЭС на основе скрытого параллелизма протоколов с использованием GERT-сетей (*Graphical Evaluation and Review Technique*) и системы массового обслуживания (СМО)  $M/M/1 - M/G/1$ . Необходимо в вероятностном графе протокола: 1) найти п.р.в. всех простых  $s-t$ -путей; 2) вычислить вероятности их прохождения; 3) найти те операции в простых  $s-t$ -путях, которые вносят наибольший вклад в суммарные колебания времени передачи; 4) найти способы их уменьшения до необходимых величин. Улучшение характеристик протокола возможно, если время прохождения хотя бы одного параллельного простого  $s-t$ -пути характеризуется: 1) одномодовым распределением с сильно затянутым «хвостом»; 2) многомодовым распределением вероятностей.

Затянутые «хвосты» появляются из-за повторения операций, например, пересылки искаженных пакетов. Чем меньше вероятность таких событий, тем более симметричной становится п.р.в. Этого можно добиться уменьшением: 1) вероятности переходов на возвратные дуги, 2) времени прохождения этих дуг путем повышения качества работы системы. Появление нескольких мод объясняется параллелизмом сетевых протоколов.

*Постановка задачи.* Режим работы стационарный. На СПД подается  $n$  простейших потоков заявок с интенсивностями  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ ; среднее время предварительной обработки

заявки –  $1/\mu$ . Необходимо найти резервы времени каждого параллельного простого  $s-t$ -пути по отношению к выбранному (опорному)  $s-t$ -пути, и предельно допустимую вариацию интервала времени между соседними пакетами в агрегированном  $s-t$ -пути. Для параметров выбранного  $s-t$ -пути должно задаваться  $t_{\text{оцр}} \geq t_{\text{іср}}$  (при положительном значении резерва),  $\sigma_o \leq \sigma_i$ , где  $t_{\text{оцр}}$  и  $t_{\text{іср}}$  – средние задержки передачи, а  $\sigma_o$  и  $\sigma_i$  – среднеквадратические отклонения времени передачи выбранного и  $i$ -х простых  $s-t$ -путей. Должны выполняться условия: 1) время  $Z$  – передачи пакетов “из конца – в конец”  $s-t$ -пути  $Z = T + t_3$ , где  $T$  – задержки в  $s-t$ -пути,  $t_3$  – запас по задержке передачи; 2)  $T = t_{\text{ср}} + |l\sigma| < Z$ , где  $l$  – интервал, в который случайное время передачи пакета попадает с заданной вероятностью (например, в интервал “трех сигм”). Результатом работы алгоритма должно быть выполнение условия хорошего приближения среднеквадратического отклонения времени передачи через агрегированный  $s-t$ -путь к значению  $\sigma_o$  опорного простого  $s-t$ -пути, т.е.  $|\sigma - \sigma_o| \leq \varepsilon$ ; величина  $\varepsilon$  задается изначально.

*Определение графа  $\tilde{G}_i$ .* Пусть выполнены условия: 1)  $P_i$  есть любая петля первого порядка, не включающая источник  $s$  и сток  $t$ , и имеющая хотя бы один общий узел с  $i$ -м простым  $s-t$ -путем; 2)  $P_j$  есть любая петля первого порядка, не включающая исток  $s$  и сток  $t$ , и имеющая хотя бы один общий узел с  $j$ -м простым  $s-t$ -путем; 3) любые петли  $P_i$  и  $P_j$  не имеют общих узлов. Тогда совокупность дуг и узлов  $i$ -го простого  $s-t$ -пути и множества петель  $P_i$ ,  $i = \overline{1, m}$  есть частичный граф  $\tilde{G}_i$ ,  $i = \overline{1, k}$ .

Эквивалентная  $W$ -функция параллельно соединенных частичных графов  $\tilde{G}_1, \dots, \tilde{G}_k$   

$$W_E(s) = W_{\tilde{G}_1}(s) + \dots + W_{\tilde{G}_k}(s).$$

*Алгоритм решения задачи* состоит из следующих шагов.

1. Задаем  $t_{\text{оцр}}$  и  $\sigma_o$ .
2. Выбираем достаточно малое значение  $|\sigma_i - \sigma_o| \leq \delta$ ,  $i = \overline{1, q}$ , где  $q$  – число простых  $s-t$ -путей, имеющих резервы времени.
3. Производим расчет п.р.в. времени прохождения исходной GERT-сети от источника к стоку. Если справедливо  $\varepsilon \leq |\sigma - \sigma_o|$ , то – переход на пункт 11.
4. Разлагаем исходную GERT-сеть на параллельные частичные графы  $\tilde{G}_i$ ,  $i = \overline{1, k}$ .
5. Производим расчет п.р.в. времен прохождения частичных графов  $\tilde{G}_i$ ,  $i = \overline{1, k}$ .
6. Изменяем значения резервов  $t_{3i}$ , так, чтобы  $t_{\text{іср}} = t_{\text{оцр}}$ ,  $i = \overline{1, q}$ ,  $i \neq o$ .
7. Находим  $\sigma^* = \max \{ \sigma_i \}$  всех  $q$  простых  $s-t$ -путей.
8. Уменьшаем  $\sigma_i$  пути, для которого  $\sigma^* = \sigma_i$ . Значение  $\sigma_i$  изменяется за счет уменьшения вероятности и времени выполнения возвратных дуг  $\tilde{G}_i^*$ . Рассчитываем уточненную п.р.в. для графа  $\tilde{G}_i^*$ . Итерации продолжаются до выполнения  $|\sigma_i - \sigma_o| \leq \delta$ .

9. Если  $q=1$ , то – п. 10, иначе уменьшаем значение  $q$  на 1 и переходим на п. 7.

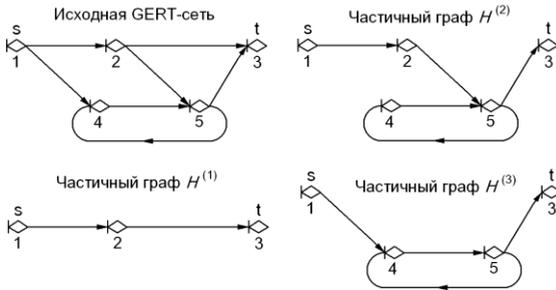
10. Рассчитываем п.р.в. для измененной GERT-сети по  $s-t$ -пути. Если  $\varepsilon \leq |\tilde{\sigma} - \sigma_0|$  ( $\tilde{\sigma}$  – среднееквадратическое отклонение времени прохождения измененной GERT-сети), то – переход на п. 11, иначе уменьшаем  $\sigma_o$  и переходим на п. 7.

11. Конец алгоритма.

По формулам для СМО  $M/G/1$  получены средние значения: *числа пакетов в канале и в очереди, время нахождения пакета в очереди, и передачи через канал.*

Предлагается метод определения *периода занятости* СПД ПИК выявлением параллелизма протоколов передачи пакетов с использованием GERT-сетей СМО  $M/G/1$ .

Многомодовые распределения характерны для их смеси, когда  $p_1$  есть вероятность величины  $\xi_1$  а  $p_2$  – величины  $\xi_2$ . Эквивалентная п.ф.м.  $M_E(s) = p_1 M_1(s) + p_2 M_2(s)$ , где  $M_1(s)$  и  $M_2(s)$  – п.ф.м. величин  $\xi_1$  и  $\xi_2$  с математическими ожиданиями  $m_{(1)}$ ,  $m_{(2)}$  и дисперсиями  $\sigma_{(1)}^2$  и  $\sigma_{(2)}^2$ . Математическое ожидание и дисперсия выходных величин:  $m_E = p_1 \mu_1^{(1)} + p_2 \mu_1^{(2)} = p_1 m_{(1)} + p_2 m_{(2)}$ ,  $\sigma_E^2 = p_1 \mu_2^{(1)} + p_2 \mu_2^{(2)} - (p_1 m_{(1)} + p_2 m_{(2)})^2$ , где  $\mu_2^{(1)}$  и  $\mu_2^{(2)}$  – вторые начальные моменты величин  $\xi_1$  и  $\xi_2$ . По определению  $\sigma_{(1)}^2 = \mu_2^{(1)} - [\mu_1^{(1)}]^2$ ,  $\sigma_{(2)}^2 = \mu_2^{(2)} - [\mu_1^{(2)}]^2$ . Тогда  $\sigma_E^2 = p_1 \sigma_{(1)}^2 + p_2 \sigma_{(2)}^2 + p_1 p_2 [m_{(1)} - m_{(2)}]^2$ . Для уменьшения дисперсии фрагмента, состоящего их двух параллельных дуг, мы должны: 1) уменьшать дисперсии  $\sigma_{(1)}^2$  и  $\sigma_{(2)}^2$ ; 2) уменьшать разность  $|m_{(1)} - m_{(2)}|$ ; 3) увеличивать разность  $|p_1 - p_2|$ , так как произведение  $p_1 p_2$  имеет максимум, равный 0,25 при  $p_1 = p_2$  и минимум, когда  $p_1$  или  $p_2$  равны нулю. Пример GERT-сети и ее разложение представлены на рисунке 4.



Можно выделить 3 параллельно соединенных частичных графа  $H^{(1)}$ ,  $H^{(2)}$ ,  $H^{(3)}$ . В сети имеется три простых  $s-t$ -пути: (1, 2, 3); (1, 2, 5, 3); (1, 4, 5, 3). Разлагая GERT-сеть на частичные графы  $H^{(i)}$ , получаем:

$$W_E = W_{1,2} W_{2,3} + \frac{W_{1,2} W_{2,5} W_{5,3}}{1 - W_{4,5} W_{5,4}} + \frac{W_{1,4} W_{4,5} W_{5,3}}{1 - W_{4,5} W_{5,4}}$$

Рис. 4. Разложение GERT-сети на частичные графы

Преобразования GERT-сети выполнены в 4 шага: 1) изменение параметра цикла; 2) изменение времени выполнения операции (3, 5); 3) изменение времени выполнения операции (2, 5); 4) изменение времени выполнения операции (4, 5). Последовательное изменение плотности распределения вероятностей выходной величины GERT-сети показано на ри-

сунке 5. Плотности распределения вероятностей, полученные после каждого шага, отмечены цифрами в кружках. Пунктирной линией изображены п.р.в. на предыдущем шаге.

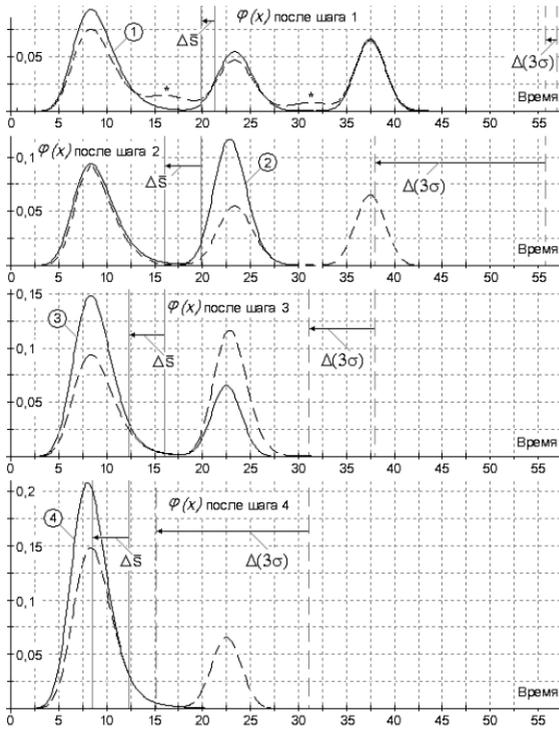


Рис. 5. Трансформации плотности распределения выходной величины GERT-сети

Найдены средняя длина и дисперсия периода занятости для системы  $M/G/1$ . Определена зависимость средней длины периода занятости от среднего значения времени передачи для СПД ОЭС ПИК

**В главе 4** выполнено имитационное моделирование СПД ОЭС ПИК со следующими целями: 1) проверки адекватности аналитических моделей каналов путем сравнения расчетов, проведенных с их использованием, с результатами имитационного моделирования; 2) моделирование режимов периодической выдачи команд на объекты контроля и управления с учетом возможного влияния очередей на показатели качества системы.

Для агрегированного канала получено ( $T$  – постоянная составляющая времени передачи,  $\mu$  – параметр нормированного распределения Эрланга 2 порядка):

- среднее число заявок в системе  $\bar{N}_{\text{арп}} = \frac{\lambda(8\mu T + 11)}{16\mu} + \frac{\lambda^2[(8\mu T + 11)^2 + 35]}{32\mu[16\mu - \lambda(8\mu T + 11)]}$ ;
- среднее число заявок в очереди  $\bar{N}_{\text{q арп}} = \frac{\lambda^2[(8\mu T + 11)^2 + 35]}{32\mu[16\mu - \lambda(8\mu T + 11)]}$ ;
- среднее время пребывания в системе  $\bar{T}_{\text{арп}} = \frac{8\mu T + 11}{16\mu} + \frac{\lambda[(8\mu T + 11)^2 + 35]}{32\mu[16\mu - \lambda(8\mu T + 11)]}$ ;
- среднее время пребывания в очереди  $\bar{W}_{\text{арп}} = \frac{\lambda[(8\mu T + 11)^2 + 35]}{32\mu[16\mu - \lambda(8\mu T + 11)]}$ .

Расхождение этих значений и результатов имитации составляет порядка 1 %. На основании сравнения результатов имитационного эксперимента с известными соотношениями для моделей каналов, интерпретируемых как СМО  $M/G/1$ , можно сделать вывод о корректности полученных в диссертации результатов.

Предложена модель работы СПД ОЭС при испытаниях летательных аппаратов. Схема передачи информации в процессе полета ЛА изображена на рисунке 6.

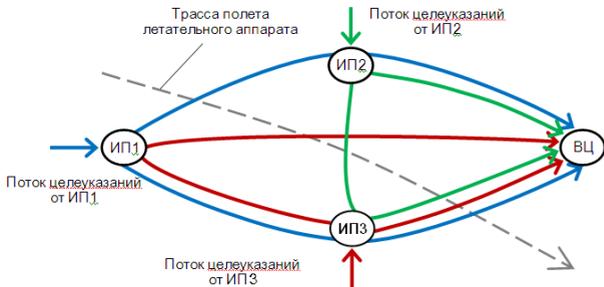


Рис. 6. Трансформации плотности распределения выходной величины GERT-сети

Целеуказания от измерительных пунктов ИП1, ИП2, ИП3 передаются в ВЦ по двухпутевым трактам. ИП отслеживают координаты по дальности, азимуту и углу места и передают другим ИП для повторного наведения на объект при срыве сопровождения. Рассматривается случай, когда на начальном участке траектории летательного аппарата сопровождается только ИП1, а два другие ИП его «не видят». После прохождения начального участка полета сопровождение летательного аппарата передается ИП2 и ИП3, а средства ИП1 по своим техническим характеристикам не могут гарантированно поддерживать сопровождение летательного аппарата. Это приводит к перераспределению потоков целеуказаний по СПД. Необходимо проанализировать работу сети с целью задания режимов работы и недопущения перегрузок СПД ОЭС из-за образования очередей пакетов. Имитационная модель СПД при передаче ИИ реального времени изображена на рисунке 7.

В имитационной модели сети блоки G1 и «Измерит. пункт 1» функционируют 1000 ед. времени и выключаются блоком TR2 посредством блока-вентиля V1, отключающего поток целеуказаний. Блоки G2, G3, «Измерит. пункт 2» и «Измерит. пункт 3» начинают работу с 1000 ед. времени.

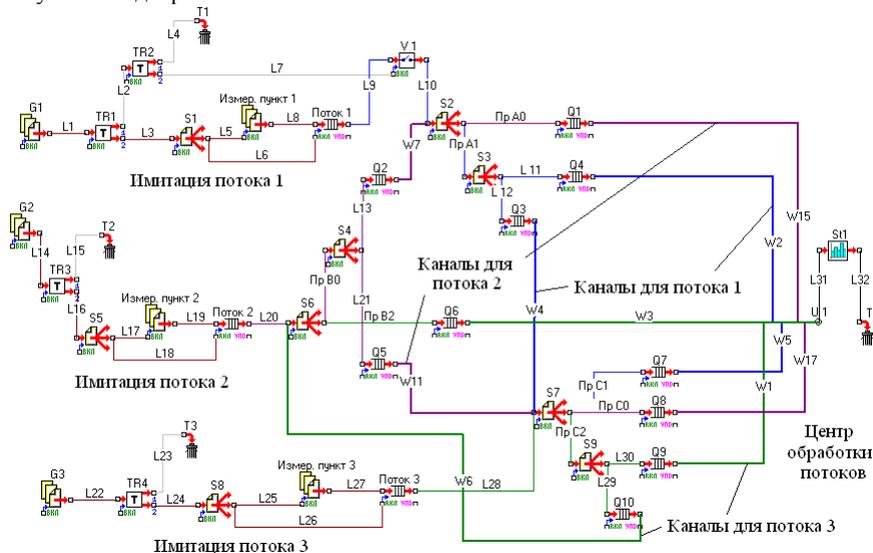


Рис. 7. Модель СПД ОЭС ПИК

Маршрутизация потоков в схемах, имитирующих работу ИП-ов, осуществляется селекторами S2, S6 и S7. Имитируются задержки в каналах через экспоненциальные величины со средним 10 ед. Потоки, вырабатываемые ИП-ами – пуассоновские с интервалами выдачи пакетов в 5 ед. В блоках-очередях с временно выключенными выходами «Поток 1», «Поток 2», «Поток 3», накапливаются случайное число пакетов. Эти блоки включаются в работу вначале очередного цикла выдачи целеуказаний регуляторами времени TR1, TR3, TR4. После этого накопленные потоки мгновенно передаются в очереди Q1–Q10 для имитации процесса передачи пакетов через каналы связи. Генерация потоков от ИП1 происходит в отрезки времени [100, 200]; [300, 400]; [500, 600]; [700, 800]; [900, 1000]. Заявки в очереди Q3 передаются через канал до начала нового отрезка для выдачи целеуказаний. Начиная с момента времени 1000 ед. имитационный блок «Измерит. пункт 1» прекращает работу, а блоки «Измерит. пункт 2» и «Измерит. пункт 3» начинают функционирование.

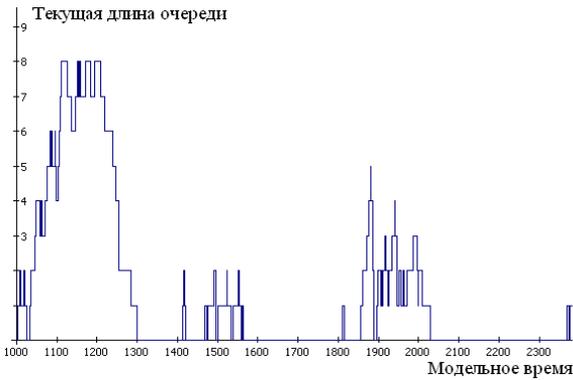


Рис. 8. Текущая длина очереди Q2

На рисунке 8 приведена диаграмма изменения очереди Q2, которая принимает поток заявок целеуказаний от блока «Измерит. пункт 2». Здесь начала отрезков выдачи целеуказаний равны 1000, 1400, 1800, 2200 ед. времени. Первого интервала [1000, 1200] не хватает для передачи всех пакетов, но резерв времени достаточен для того, чтобы это сделать до момента времени 1400 ед.

В данной главе предложена новая научная методика автоматизированного проектирования сети передачи ОЭИ и СИ при проведении испытаний ЛА с выдачей потоков целеуказаний в реальном времени. В отличие от прототипов она позволяет обеспечивать контроль вариации времени передачи пакетов и потоков для агрегированных каналов, а также обеспечивает оптимальный запас полосы пропускания сети с многопутевой маршрутизацией. Это обеспечивает подключение резервных путей в случае возникновения отказов сети без проведения относительно длительной повторной маршрутизации.

**В пятой главе** выполнены экспериментальные расчеты вероятностно-временных характеристик СПД ОЭС ПИК на основе методов разработанных в диссертации – для космического сегмента (КС) и для двухфазной базовой сети с нахождением наилучших значений вероятности мутации и числа полезных особей в популяции генетического алгорита.

Расчеты выполнены для базовой оптоволоконной сети, усиленной радиорелейной связью, и КС (рисунок 9). Передача ИИ по КС происходит при больших нагрузках с простейшим входным потоком интенсивности  $\lambda_m$  в 2 режимах.

*1. По алгоритму старт-стопной передачи пакета.* Для анализа используется GERT-сеть, изображенная на рисунке 10.

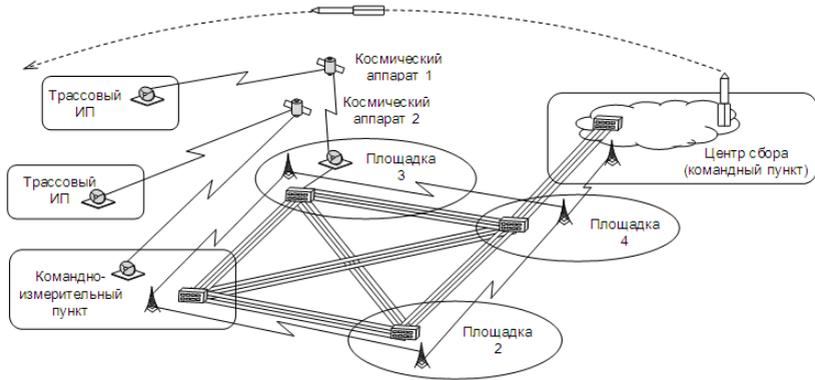


Рис. 9. Экспериментальный фрагмент сети передачи данных ПИК ОЭИ

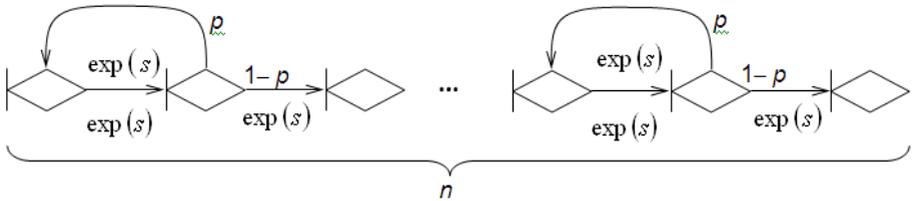


Рис. 10. Модель стар-стопной передачи ИИ

Получены выражения для средней длины очереди  $W$  и среднего времени пребывания  $T$  ИИ из  $n$  пакетов при передаче по КС с вероятностью сбоя пакета  $p$  :

$$W = \frac{2\lambda n(n+p)}{(1-p-2\lambda n)(1-p)}, \quad T = \bar{X} + W = \frac{2n}{1-p} \left[ 1 + \frac{\lambda(n+p)}{1-p-2\lambda n} \right].$$

2. Для оконной передачи «с возвратом на  $n$  шагов назад» (рисунок 11) получены следующие результаты.

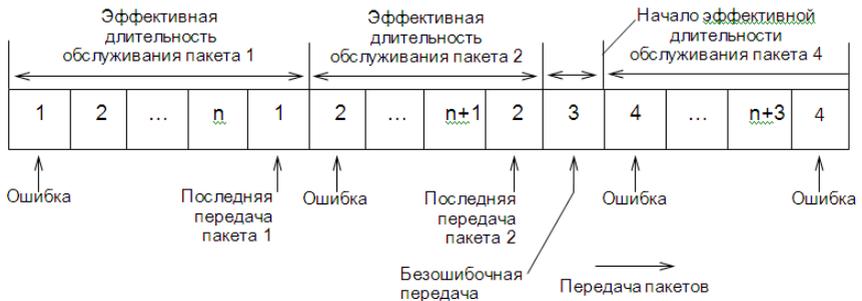


Рис. 11. Иллюстрация эффективных длительностей обслуживания пакетов.

Для  $n$  пакетов найдены средние значения: времени передачи, дисперсии, нахождения в очереди и в системе:

$$\bar{X}_n = \frac{n(1+np)}{1-p}, \quad \sigma_n^2 = \frac{n(n+1)^2 p}{(1-p)^2}, \quad W_n = \frac{\lambda \bar{X}_n^2}{2(1-\lambda \bar{X}_n)}, \quad T_n = \bar{X}_n + W_n.$$

**Выводы:** 1) при оконной передаче колебания  $\bar{X}$  больше, чем в старт-стопном алгоритме; 2) значения  $W$  и  $T$  лучше для алгоритма оконного управления, так как с уменьшением  $p$  увеличивается вероятность ухода из очереди группы пакетов, и не требуется при приеме каждого пакета передавать квитанцию о подтверждении правильности приема; 3) алгоритм оконного управления более устойчив к возрастанию нагрузки. Вероятностно-временные характеристики КС использовались для определения входных данных матрицы трафика базовой СПД.

Для планирования потоков в сетях с двухфазной маршрутизацией использованы генетические алгоритмы и рассмотрено влияние степени мутации генетического алгоритма на его производительность. Целью оптимизации является сведение к минимуму  $\sum_l g(y_l/c_l)$  при предельно допустимых значениях средней задержки передачи потока и ее вариации в пути  $l$ , где  $l$  – порядковый номер линии сети,  $c_l$  – фиксированная предельная скорость передачи данных по линии  $l$ .  $y_l = \sum_{j,k} x^{(j,k)} \rho_l^{(j,k)}$  – объем трафика по

каждой линии, где  $x^{(j,k)}$  – скорость трафика, входящего в маршрутизатор  $j$ , который предназначен маршрутизатором  $k$ . Штрафная функция  $g$  является выпуклой, неубывающей и дважды дифференцируемой экспоненциальной функцией, которая налагает штраф при увеличении нагрузки линии.

Эксперименты проводились на компьютере с характеристиками: Intel Core i7 2,0 GHz, RAM 8Gb. Параметры генетического алгоритма: размер популяции – 40 особей, вероятность скрещивания – 0,8, число поколений – 100. Процент мутации от 0,01 до 0,5: 0,01/0,03/0,05/0,07/0,1/0,15/0,2/0,3/0,4/0,5. Были рассмотрены сети с двухфазной маршрутизацией из 8, 16 и 32 узлов. Для каждого варианта было проведено 30 экспериментов. Оптимальное значение мутации 5 – 10 % для сетей не более чем из 32 узлов. Отклонение от этих показателей в большую или меньшую сторону ухудшает результат.

Определено число полезных особей в популяции генетического алгоритма. Были рассмотрены сети из 4, 8, 16 и 32 узлов. Размер популяции варьировался от 10 до 200 особей. Для всех популяций было сгенерировано фиксированное число поколений – 100.

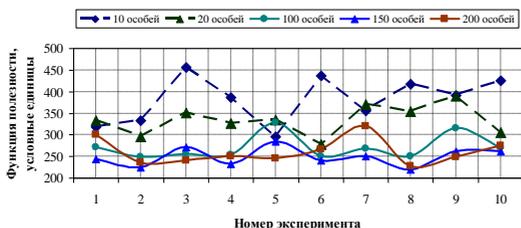


Рис. 12. Средние значения функции полезности, полученные для сети с двухфазной маршрутизацией из 8 узлов

Для каждого варианта было проведено 10 экспериментов. На рисунке 12 приведены графики для сети из 8 узлов. Увеличение размера популяции с 10 до 100

особей существенно уменьшает среднее значение функции полезности.

**В Заключении** подведены результаты проведенных исследований, отмечены наиболее важные из них в теоретическом и практическом плане. Приведены сведения об использовании результатов диссертации на практике и внедрении разработанных методов, алгоритмов и программ.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Разработана модель передачи измерительной информации по базовому агрегированному каналу полигонной сети с нахождением распределения вероятностей времени передачи потока в отличие от прототипов, в которых находится только дисперсия времени передачи кадра по каналу между оконечными маршрутизаторами суммированием дисперсий времени передачи по отдельным каналам. Предложена методика нахождения нормативных времен для передачи пакетов и потоков по двухфазным путям между оконечными маршрутизаторами ядра измерительной сети с использованием численных методов и программ нахождения характеристик выходных случайных величин GERT-сетей.

2. Разработан метод улучшения временных характеристик сети передачи данных полигонного измерительного комплекса с предварительной обработкой пуассоновского входного потока. Используется разложение GERT-сети протокола на параллельные компоненты и выравнивание времени их прохождения. Применена модель массового обслуживания M/M/1-M/G/1, в которой задержка в обслуживающем приборе второй фазы связывается с выходной случайной величиной GERT-сети протокола.

3. Разработан метод уточнения средней длины и дисперсии периода занятости сети передачи данных полигонного измерительного комплекса на основе системы массового обслуживания M/G/1, в которой задержка в обслуживающем приборе связывается с выходной случайной величиной GERT-сети протокола. Используется разложение GERT-сети на параллельные компоненты.

4. Разработан метод улучшения показателей качества сети передачи измерительной информации с разделением трафика на синхронный и асинхронный на основе разложения протокола передачи на параллельные компоненты с корректировкой характеристик отдельных операций. Используется система массового обслуживания M/G/1 с перерывами, в которой задержка в обслуживающем приборе связывается с выходной случайной величиной GERT-сети протокола. Применяется разложение GERT-сети на параллельные компоненты.

5. Предложена методика автоматизированного проектирования полигонной сети в режиме реального времени, при передаче трафика, изменяющегося в зависимости от траектории полета летательных аппаратов. Она основывается на построении трактов передачи из параллельных двухфазовых путей между оконечными маршрутизаторами VLB-ядра сети и применении генетических алгоритмов для оптимизации прокладки виртуальных каналов с целью максимизации резервов полосы пропускания общего физического канала для обработки пульсаций трафика без временных затрат на проведение перемаршрутизации сети. Полномасштабная измерительная сеть полигона строится путем объединения VLB-сетей, с подключенными к ним сетями доступа, и космического сегмента связи.

### **ВАЖНЕЙШИЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

#### **В изданиях по перечню ВАК:**

1. Ижванов Ю.Л., Корячко В.П., Шибанов А.П., Сапрыкин А.Н., Лукьянов О.В. Оптимизация сети с дозированной балансировкой нагрузки // Научно-технический журнал «Системы управления и информационные технологии». Москва-Воронеж, 2012. № 3(49). С. 37-42.

2. Ижванов Ю.Л., Корячко В.П., Шибанов А.П., Сапрыкин А.Н., Лукьянов О.В. Оптимизация сетей с дозированной балансировкой нагрузки и пиринговыми каналами // Вестник РГРТУ. Вып. 43. 2013. С. 67-74.

3. Корячко В.П., Лукьянов О.В., Шибанов А.П. Нахождение скрытого параллелизма протоколов для улучшения характеристик сети передачи данных полигонного измерительного комплекса // Вестник РГРТУ, 2014. № 1(47). С. 68-75.

4. Корячко В.П., Лукьянов О.В., Шибанов А.П. Нахождение периода занятости сети передачи данных полигонного измерительного комплекса // Успехи современной радиоэлектроники, 2014. № 6. С. 10-17.

#### **Другие публикации:**

5. Лукьянов О.В., Ю.А. Новиков, Сериков С.А. Использование стека протоколов TCP/IP в спутниковых системах передачи данных, работающих в реальном времени // 4-я международная научно-техническая конференция "Космонавтика, радиоэлектроника, геоинформатика". Рязань: Рязанская государственная радиотехническая академия, 2003 . С. 254-258.

6. Лукьянов О.В., Кашеев А.А., Лукашов Н.А. Территориально-распределенная сеть передачи измерительной информации по спутниковым линиям связи с применением технологии DVB-RCS // 14-я международная научно-техническая конференция "Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций". Рязань: Рязанская государственная радиотехническая академия, 2005. С. 98-99.

7. Кашеев А.А., Лукьянов О.В. Влияние надежности линии спутниковой связи на выбор объема канального кадра. Межвузовский сборник научных трудов. Новые информационные технологии, Рязань. 2006. С. 39-44.

8. Кашеев А.А., Лукьянов О.В. Выбор оптимального объема кадра при передаче информации в системах спутниковой связи // Всероссийский научно-практический семинар "Сети и системы связи". Рязань: Рязанское высшее военное командное училище связи имени маршала Советского Союза М.В. Захарова, 2006. С. 137-139.

9. Кашеев А.А., Лукьянов О.В., Каплин Е.В. Влияние параметров протокола транспортного уровня на скорость передачи трафика в системах спутниковой связи // Научно-техническая конференция "Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий". Москва: Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения, 2007.

10. Лукьянов О.В., Каплин Е.В. Автоматизация процессов управления в распределенных системах сбора и обработки измерительной информации // Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники и ее роль в устойчивом социально-экономическом развитии общества». Самара: ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ – Прогресс», 2009 . С. 174-175.

11. Лукьянов О.В., Каплин Е.В. Исследование протокола передачи измерительной информации в реальном времени в условиях ограниченной пропускной способности канала передачи данных и высокой вероятности появления ошибок в канале. // II Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники», Самара., 2011.

12. Лукьянов О.В., Каплин Е.В. Перспективный высоконадежный способ управления измерительными средствами в условиях реального времени. // Отраслевая научно-техническая конференция приборостроительных организаций Роскосмоса "Информационно-управляющие и измерительные системы-2012", г. Королев: ОАО "НПО ИТ", 2012.

13. Шибанов В.А., Лукьянов О.В., Стрелкова О.А. Сети Петри с отрицательными метками и метками-триггерами // Тез. докл. XVII Всероссийской научно-технической конференции «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (НИТ-2013). 2013. С. 76-78.

14. Каплин Е.В., Лукьянов О.В., Нечеса И.А. Управление потоком передачи измерительной информации в реальном времени // Тез. докл. XI Всероссийской конференции по проблемам новых технологий, посвященной 90-летию со дня рождения академика В.П. Макеева, г. Миасс., 2014.

15. Лукьянов О.В. Распределение времени передачи потока измерительной информации случайной длины // Межвуз. сб. трудов «Информационные технологии», Рязань, РГРТУ, 2014. С. 66-71.

**Лукьянов Олег Викторович**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ОПТИКО-  
ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ПОЛИГОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО  
КОМПЛЕКСА**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук