

На правах рукописи



Фам Хоанг Лонг

**МОДЕЛИ, МЕТОДЫ И ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА
ПОЛОСЫ ПРОПУСКАНИЯ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Специальность: 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2017

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

Научный руководитель: **Шибанов Александр Петрович**
доктор технических наук, профессор кафедры САПР ВС ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет», г. Рязань.

Официальные оппоненты: **Минаев Владимир Александрович**
доктор технических наук, профессор кафедры «Защита информации» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва;
Тихомиров Сергей Александрович
кандидат технических наук, начальник отдела филиала АО «РКЦ «Прогресс» – ОКБ «Спектр», г. Рязань.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования **«Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»**, г. Самара.

Защита диссертации состоится 25 октября 2017 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.211.02 в ФГБОУ ВО «РГРТУ» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет», а также на сайте ФГБОУ ВО «РГРТУ» www.rsreu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент



Д.А. Перепелкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Измерительные средства (ИС) для передачи информации о проведении испытаний летательных аппаратов (ЛА) передают трафик одновременно от множества объектов: самолетов и ракет, изделий, выполняющих функции мишеней, беспилотных летательных аппаратов, и т. п. ЛА могут менять свое местоположение, переходя из зон слежения одних ИС в зоны слежения других ИС. Если ЛА покидает зону сопровождения ИС, то сопровождение этого ЛА должно быть заблаговременно передано соседним ИС. Для этого те ИС, которые должны захватить цель и сопровождать ее дальше, должны получить целеуказания по азимуту, углу места и дальности от еще сопровождающих данный объект ИС. Возможны срывы сопровождения отдельных ИС – частичное, по отдельным координатам, или полное, по всем координатам. Те ИС, которые сопровождают данный ЛА в штатном режиме, должны передать команды наведения на ИС, «потерявшие» этот ЛА, для повторного «захвата» и дальнейшего штатного сопровождения. К сетям передачи измерительной информации (ИИ) должны быть предъявлены повышенные требования по задержкам передачи информации и отказоустойчивости в условиях изменения трафика, зависящего от хода испытаний. Решить проблему построения сетей для передачи больших объемов ИИ, преимущественно видеoinформации, проблематично без использования программно-конфигурируемых сетей (ПКС). Использование ПКС позволяет проектировщику сети полигонного измерительного комплекса (ПИК) реализовывать свои методы, алгоритмы и программы в виде кодов контроллеров операционной системы, управляющих маршрутизаторами по передаче данных. Это разбиение сообщений от ИС на части для параллельной передачи, многопутевая маршрутизация, операции по обеспечению отказоустойчивости сети.

Задача создания сети ПИК для проведения испытаний ЛА является *актуальной* и может быть решена на основе разработки специализированных сетевых протоколов с применением ПКС. Актуальность темы диссертации подтверждается тем, что она выполнялась при финансовой поддержке РФФИ в форме гранта 14-07-00106-а «Методы автоматизированного проектирования перспективной сети передачи данных полигонного измерительного комплекса» (2014 г.) и в рамках госзадания № 9-14Г (госрегистрация НИР № 115011560084).

Степень разработанности темы исследования. В разработку методов и алгоритмов управления многопоточным трафиком внесли заметный вклад Вишневецкий В. М., Корячко В. П., Ляхов А. И., Башарин Г. П., Бочаров П. П., Коган Я. А., Захаров Г. П., Борисов В.И., Зинчук В.М., Капаева Т.Ф., Лимарев А.Е., Мухин Н.П. и многие другие ученые. Появ-

ление концепции ПКС можно связать с проектами исследовательских групп Стэнфордского и Принстонского университетов, среди них следует отметить Doyle J., Jiayue H., Umar J., Jin C., Kelly N., Lin X., Low F., Palomar D., Peterson L., Rexford J., Shroff, D., Srikant B., Suchara M., Xiao X., Wang L. и др.

Основной метод выпуклой оптимизации сетей ПКС предложен группой авторов под научным руководством профессора Принстонского университета Дженнифер Рексфорд. Метод является распределенным, адаптивным, надежным, гибким и простым в управлении. Но в распределении функций между приложениями и операторами сети существует сдвиг в сторону автономных систем (AS). Определение весов каналов и путей, оценка их загрузки, а также поиск наилучших путей при маршрутизации выполняются в пределах AS. Могут возникнуть проблемы плохой стыковки частей маршрутов при передаче потоков через несколько AS. Алгоритмы оптимизации при возникновении пульсаций постепенно отрабатывают перегрузку, что может приводить к неприемлемым потерям кадров.

Другим источником для проведения исследований в целях создания локальных сетей крупных измерительных пунктов, таких как вычислительные центры, центры управления испытаниями, стартовые позиции и районы приземления, стали идеи Valiant L. G. по созданию схемы многопоточковой двухфазовой маршрутизации, реализованной в VLB-сетях, которая улучшает характеристики производительности и надежности коммутаторов, маршрутизаторов и высокоскоростных трактов сетей. Фундаментальные свойства VLB-сетей заключаются в том, что они инвариантны к изменению нагрузки, в том числе и при передаче транзитного трафика, которым и является трафик, порождаемый испытаниями ЛА.

Целью исследований является сокращение сроков проектирования, уменьшение затрат и разработка методов планирования полосы пропускания сети передачи данных от ИС до центров управления испытаниями летательных аппаратов и выдачи команд управления на ИС и ЛА. С использованием концепции ПКС требуется решить следующие *задачи*.

1 Нахождение в реальном масштабе времени распределения времени передачи кадров измерительных средств на основе данных, полученных на предыдущих этапах вычислений, путем использования информации об увеличении или уменьшении числа звеньев в пути передачи информации.

2 Расчет вероятности своевременной доставки кадров и потоков от измерительных средств до центра управления полетом летательных аппаратов. Оптимизация полосы пропускания путей передачи транзитного трафика, порождаемого испытаниями ЛА, при наличии в данных путях VLB-сетей.

3 Нахождение показателей качества сети передачи потоковой измерительной информации через несколько звеньев сети, состоящих из неоднородных агрегированных каналов.

4 Нахождение распределения времени передачи кадра от измерительных средств до центра управления испытаниями с двухпутевой двухфазной маршрутизацией информации и выполнением циклов восстановления при отказах.

5 Повышение отказоустойчивости сетевого оборудования за счет установки контрольных точек в программах с учетом их текущего состояния для систем с большим числом циклических операций.

6 Определение полосы пропускания сети передачи данных измерительных средств с учетом времени нахождения кадров в очередях маршрутизаторов.

Научная новизна. В диссертации содержится решение актуальной научной задачи разработки методов, моделей и программ для проектирования полосы пропускания сетей передачи данных ИС при испытаниях ЛА, имеющей существенное значение для сокращения сроков, уменьшения затрат и повышения качества проектирования ПИК с повышенными требованиями по производительности и надежности. Научная новизна сформулирована в положениях, изложенных ниже.

1 Не имеющий аналогов аналитический метод нахождения закона распределения длительности передачи кадров измерительных средств на основе результатов, полученных на предыдущих этапах вычислений, заключающийся в увеличении (или уменьшении) числа особых точек в контуре Бромвича, для случаев увеличения (или уменьшения) числа звеньев в пути передачи информации.

2 Задача оптимизации полосы пропускания путей передачи кадров измерений через сети с двухпутевой двухфазной маршрутизацией с нахождением распределения совокупной полосы пропускания канала и выполнением операций восстановления при отказах оборудования (что отличает ее от прототипов).

3 Модель передачи информации измерительных средств через несколько звеньев сети с разным числом виртуальных каналов в каждом, отличающаяся от прототипов тем, что она отражает передачу потока, длина которого характеризуется случайным числом случайных слагаемых.

4 Аналитический метод теории GERT-сетей, предназначенный для нахождения распределения времени передачи кадра от измерительных средств до центра управления испытаниями с двухпутевой двухфазной маршрутизацией и выполнением циклов восстановления при отказах, что отличает его от прототипов.

5 Численный метод повышения отказоустойчивости сетевого оборудования на основе определения мест установки контрольных точек в программах, в котором, в отличие от прототипа, учитывается текущее состояние программы и за счет этого уменьшаются значения интервалов выдержки сторожевых таймеров, а соответственно и время их реакции на отказы оборудования.

6 Методика моделирования полосы пропускания сети передачи данных измерительных средств с учетом времени нахождения кадров в очередях маршрутизаторов, в которой, в отличие от прототипов, используется визуально-ориентированное представление объектов имитации на втором, более высоком уровне моделирования, с использованием выборочных значений случайных величин, полученных на первом уровне, как результатов расчета GERT-сетей.

Теоретическая и практическая значимость работы. На основе разработанных моделей, методов и программ созданы инженерные методики и программные средства проведения численных расчетов показателей качества сетей передачи информации от ИС при испытаниях ЛА. Возможно их применение в следующих областях:

- в магистральных сетях ПИК со скоростью передачи в десятки Гбит/с;
- в сетях доступа ПИК с применением многопутевой маршрутизации;
- для построения отказоустойчивой системы передачи измерительной информации об испытаниях ЛА;
- при разработке систем управления опасными объектами, такими как химические производства, атомные электростанции, непрерывные производства, взрыво- и пожароопасные предприятия и т. п.

Методология и методы исследования. Методология связана с анализом логической структуры методов и построения теоретических положений диссертации, истинности и аргументированности результатов.

Положения, выводы и экспериментальные результаты диссертационной работы получены с использованием: теории графов, полумарковских моделей, методов нахождения распределений выходных характеристик GERT-сетей, теории вероятностей, теории аналитических функций комплексного переменного, теории массового обслуживания, теории имитационного моделирования, математической статистики, генетических алгоритмов.

Положения, выносимые на защиту.

1 Не имеющий аналогов аналитический метод корректировки плотности распределения вероятностей времени передачи кадров измерительных средств на основе расчетов, выполненных ранее, путем удаления

или добавления особых точек в контуре Бромвича при изменении числа звеньев в пути передачи информации.

2 Задача оптимизации полосы пропускания путей передачи кадров, при наличии в них сетей с двухпутевой двухфазной маршрутизацией с нахождением распределений совокупной полосы пропускания канала, что отличает ее от прототипов.

3 Не имеющая прототипов модель передачи потока кадров измерительных средств через несколько каналов сети с разным числом однородных виртуальных соединений в каждом.

4 Аналитический метод теории GERT-сетей, предназначенный для нахождения распределения времени передачи кадра от измерительных средств до центра управления испытаниями с двухпутевой двухфазной маршрутизацией и выполнением циклов восстановления при отказах, что отличает его от прототипов.

5 Численный метод повышения отказоустойчивости сетевого оборудования на основе определения мест установки контрольных точек в программах, в котором, в отличие от прототипа, учитывается текущее состояние программы и за счет этого уменьшаются значения интервалов выдержки сторожевых таймеров, а соответственно и время их реакции на отказы оборудования.

6 Методика моделирования полосы пропускания сети передачи данных измерительных средств с учетом времени нахождения кадров в очередях маршрутизаторов, в которой, в отличие от прототипов, используется визуально-ориентированное представление объектов имитации на втором, более высоком уровне моделирования, с использованием выборочных значений случайных величин, полученных на первом уровне, как результатов расчета GERT-сетей.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» по следующим пунктам: п. 1 «Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений»; п. 2 «Развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей»; п. 4 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента».

Степень достоверности и апробация результатов. Степень достоверности положений и выводов диссертации определяется:

- отсутствием противоречий с известными научными положениями;
- корректностью полученных математических результатов;
- сравнением результатов, полученных численными методами, с результатами, полученными на основе теории аналитических функций;

- сравнением результатов, полученных аналитическими методами, с результатами имитационного моделирования;

- сравнением рассчитанных резервов полосы пропускания сетевых каналов и путей с характеристиками, полученными на реальных каналах.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались и обсуждались на 4 всероссийских и международных конференциях, в том числе на XX-й юбилейной Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (Рязань, 2015); XXVIII-й международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (Рязань, 2015); международной научно-практической конференции «Наука и образование в жизни современного общества» (Тамбов, 2015); международной научно-технической и научно-методической конференции «Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2016» (Рязань, 2016).

Публикации. По итогам исследований опубликовано 14 работ, в том числе 5 статей в изданиях из перечня ВАК РФ, 4 тезиса докладов на международных и всероссийских конференциях, 4 статьи в межвузовских сборниках трудов, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Реализация и внедрение результатов работы.

- в отчете по гранту 14-07-00121-а Российского фонда фундаментальных исследований;

- в ОАО «IDB Telecommunication and Electronic Systems» (Вьетнам) при проектировании специализированной сети передачи измерительной информации;

- в учебном процессе РГРТУ на кафедре САПР ВС.

Структура работы. Диссертация содержит 146 страниц основного текста и состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 118 наименований, перечня сокращений и 3 приложений на 10 страницах. В диссертацию включено 66 рисунков и 12 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, определены цели исследований, представлены основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту.

В **первой главе** выполнен анализ состояния данной научно-технической области. Рассмотрены результаты, достигнутые другими авторами, намечены направления исследований, сформулированы задачи, решаемые в диссертационной работе.

Во **второй главе** рассматриваются модели, методы и алгоритмы оптимизации полосы пропускания каналов ПИК.

Для виртуального пути «из конца в конец» предлагается *аналитический метод* решения задачи: расчет распределения времени передачи кадра ИИ от маршрутизатора зоны до центра сбора (ЦС); частичная корректировка расчетов при удалении объекта в направлении от ЦС, а также при перемещении объекта в направлении к ЦС с сохранением предварительных вычислений. Переменная ξ времени передачи кадра ИИ аппроксимируется нормированным распределением Эрланга второго порядка при интенсивности $\mu = (0,1-2)$, выражаемым в миллисекундах. Задержка t прохождения ИИ по каналу сети может быть представлена как $t = T + \xi$, где T – постоянная составляющая. Изначально для текущих значений географических координат ЛА выполняются расчеты плотности вероятностей времени передачи кадра ИИ для множества N виртуальных каналов соединения «из конца в конец» по выражению

$$f(t) = \sum_{m=1}^N \operatorname{Res}_{z=-2\mu_m} \left[4^N e^{\xi t} \prod_{\forall m} \frac{e^{-zT_m} \mu_m^2}{(2\mu_m + z)^2} \right] \text{ через сумму вычетов относительно}$$

всех особых точек $z = -2\mu_m$. Если данный путь удлиняется до величины N^+ , то расчеты корректируются по формуле:

$$\operatorname{Res}_{z=-2\mu_m} = 4 \prod_{\varepsilon=1}^{N^+} \mu_\varepsilon^2 e^{-2\mu_m \left(t - \sum_{\varepsilon=1}^{N^+} T_\varepsilon \right)} \left\{ \left[\left(t - \sum_{\varepsilon=1}^{N^+} T_\varepsilon \right) + A \right] / B \right\}, m = \overline{1, N^+}. \text{ В выражении}$$

$$A = \sum_{\forall n, n \neq m}^{N^+} 1 / (\mu_n - \mu_m) \text{ содержится } N^+ - 1 \text{ слагаемых. В разностях}$$

$\mu_n - \mu_m$ индекс n пробегает все значения от 1 до N^+ кроме $n = m$; при этом значение m постоянно и равно номеру особой точки. В формуле

$$B = \prod_{\forall n, n \neq m}^{N^+} (\mu_n - \mu_m) \text{ разности } \mu_n - \mu_m \text{ образуются так, как это выполняется}$$

для определения A . Формируется выражение

$$\prod_{\varepsilon=1}^{N^+} \mu_\varepsilon^2 \exp \left[-2\mu_m \left(t - \sum_{\varepsilon=1}^{N^+} T_\varepsilon \right) \right].$$

Аналогично выполняется и корректировка вычетов, если число звеньев в пути «из конца в конец» уменьшается.

Рассматривается задача планирования полосы пропускания сети ПИК при проведении испытаний ЛА на основе концепции ПКС. Каждая из таких систем передает определенный вид кадров, в которых содержится траекторная информация о трассе полета и телеметрическая информация о состоянии ЛА. Кадры передаются в ЦУ через сеть с дозированной балансировкой нагрузки (или VLB-сеть) с двухпутевой маршрутизацией.

Характерной чертой VLB-сети является параллельная передача информации между оконечными узлами по двум путям одновременно, производимая через промежуточный узел. Это позволяет повысить надежность передачи информации, уменьшить время передачи и обеспечить возможность прокладки такого числа виртуальных каналов, чтобы сделать эту сеть инвариантной по отношению к задачам разных служб полигона. Для прохождения VLB-сети кадр делится на два равных пакета, снова собирается и передается дальше. Целью является обеспечение необходимых резервов полосы пропускания каналов при динамическом изменении трафика, передаваемого от ИС.

Рассматривается задача передачи кадра, разделенного на две равные части, в VLB-сети по двум параллельным маршрутам через промежуточные узлы. Производящая функция моментов времени передачи «из конца в конец»

$$M_E(s) = 8\mu^2 \left[\frac{1}{(2\mu_0 - s)^2} - \frac{1}{(4\mu_0 - s)^2} - \frac{4\mu_0}{(4\mu_0 - s)^3} \right] \cdot \prod_{i=1}^k \left[\frac{4\mu_i^2}{(2\mu_i - s)^2} \right].$$

Используя интегрирование по контуру Бромвича, получаем плотность распределения вероятности $\varphi(t)$:

$$\varphi(t) = \sum_{i=1}^{k+3} \text{Res}_i \left\{ 8\mu_0^2 \cdot 4^n \prod_{i=1}^n \mu_i^2 e^{zt} \left[\left(\frac{1}{(2\mu_0 + z)^2} - \frac{1}{(4\mu_0 + z)^2} - \frac{4\mu_0}{(4\mu_0 + z)^3} \right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \prod_{i=1}^k \frac{1}{(2\mu_i + z)^2} \right] \right\}.$$

Имеем полюсы второго порядка в точках $z = -2\mu_0$, $z = -4\mu_0$, полюс третьего порядка в точке $z = -4\mu_0$ и полюсы второго порядка при $z = -2\mu_1, z = -2\mu_2, \dots, z = -2\mu_n$.

Меньшим значениям времени передачи кадров соответствуют большие значения скоростей передачи. Топология сети представляется в виде ориентированного графа $G = (V, E, C)$, где V – это множество узлов сети, E – множество каналов (звеньев), а C – множество емкостей каналов и ограничений, связанных с этими каналами и узлами. Пусть K – множество виртуальных каналов, $k \in K$, а (s_k, t_k, λ_k) есть узел отправления, узел назначения и требования к пропускной способности виртуального канала соответственно. Пусть виртуальный канал k прокладывается через физический канал (i, j) и $x_{ij}^k = 1$, если виртуальный канал k проходит через звено (i, j) , 0 – в противном случае, а h_k обозначает ограничения на число частот виртуального канала k ; $(i, j) \in E$. Пусть c_{ij} есть емкость

канала (i, j) , а $\alpha_{ij} > 0$ – суммарное значение полосы пропускания множества виртуальных каналов в звене (i, j) . Подмножество $\Theta = \{g_1, \dots, g_M\}$ звеньев имеет максимальное значение величины α_{ij} . Описание задачи оптимизации распределения нагрузки сети представляется следующим образом:

- цель оптимизации – минимизация среднего значения совокупной полосы пропускания физических каналов сети ПИК:

$$\min \left(\bar{\alpha} = \sum_{r=1}^M \alpha_r / M \right), \text{ где } M - \text{число звеньев сети ПИК};$$

- ограничения: 1) на каждый запрос нагрузка, попадающая в узел, должна быть равна нагрузке, исходящей из него в любой узел, кроме узла отправления и узла назначения:

$$\sum_{(i,j) \in E} x_{ij}^k - \sum_{(j,i) \in E} x_{ji}^k = 0, k \in K, i \neq s_k, t_k; \quad 2) \text{ общая пропускная способность}$$

для всех запросов канала не должна превышать уровень максимального использования общей емкости канала:

$$\sum_{k \in K} \lambda_k x_{ij}^k \leq c_{ij}, (i, j) \in E; \quad 3) \text{ количество звеньев, через которые про}$$

кладывается виртуальный канал, ограничено: $\sum_{(i,j) \in E} x_{ij}^k \leq h_k, k \in K$.

Множество возможных маршрутов для k -го виртуального канала с конечными узлами (s_k, t_k, λ_k) , отвечающее приведенным выше условиям, может быть описано как $Q_k = \{q_k^1, \dots, q_k^j, \dots, q_k^{\tilde{N}_k}\}$, где $k \in K$ и q_k^j – возможные маршруты реализации k -го виртуального канала, \tilde{N}_k – число возможных реализаций k -го виртуального канала. **Задача оптимизации** сводится к нахождению множества виртуальных каналов, проложенных в звеньях: $P = \{p_1, \dots, p_k, \dots, p_K\}$, где $p_k \in Q_k$ при условии нахождения минимального значения $\bar{\alpha}$. Определим далее: $\delta_{kl}^{pk} = 1$, если виртуальный канал k проложен по каналу $l \in E$, 0 в противном случае, где l обозначает канал (i, j) . Нагрузка канала $\gamma_p(l)$ и уровень использования $\alpha_p(l)$ могут быть представлены следующим образом: $\gamma_p(l) = \sum_{k=1}^K \delta_{kl}^{pk} \lambda_k$, $\alpha_p(l) = (1/c_l) \cdot \gamma_p(l)$.

Задача является NP-трудной. Поэтому для решения поставленной задачи используются генетические алгоритмы. В данном случае структура хромосомы определяется маршрутом виртуального канала, проложенного через промежуточные узлы сети. Хромосома описывается множеством

последовательно расположенных элементов, соответствующих узлам следования виртуального канала по своему маршруту от начального узла отправления s_k до конечного узла назначения t_k . Для каждого виртуального канала должен быть выполнен пересчет распределения времени передачи кадра в распределение скорости передачи (в Мбит/с).

Разработана и зарегистрирована в Роспатент РФ программа планирования полосы пропускания каналов ПИК (рисунок 1).

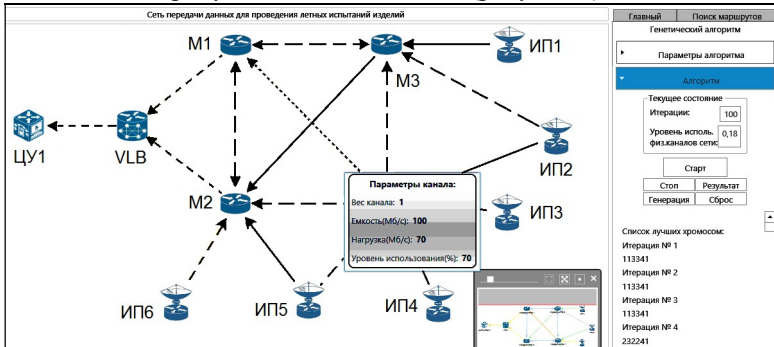


Рисунок 1 – Образец экранной формы

Решается задача для сети ПИК по передаче сообщений от ИС, состоящих из случайного числа кадров. Перед началом передачи выполняется проверка готовности коммутационного устройства (КУ) к передаче. Если устройство не готово, то оно восстанавливается за случайное время, распределенное по экспоненциальному закону. Кадры в одном звене могут передаваться по одному или нескольким параллельно работающим каналам. Время передачи кадра измерений по каналу принимается распределенным по экспоненциальному закону. Рассчитываются: среднее время передачи кадров и его дисперсия, распределение времени передачи как в отдельных звеньях, так и на тракте от одного пограничного КУ до другого.

Рассмотрен метод расчета ВВХ сети передачи данных ПИК при проведении испытаний ЛА. Учитываются время восстановления каналов при отказах. Измерительный пункт строится на основе VLB-сети. Находится плотность распределения времени передачи кадра между узлами VLB-сети. Для нахождения плотности вероятностей времени передачи кадра между узлами VLB-сети используется теория аналитических функций комплексного переменного.

В третьей главе рассматриваются модели и методы нахождения характеристик каналов ПИК. Рассмотрена модель для нахождения характеристик канала передачи данных опτικο-электронных средств траекторных измерений ЛА. Входной поток от каждого ИС является простейшим с заданным приоритетом. Передача кадров через канал производится на

основе оконного управления. Приемник, приняв искаженный кадр, посылает передатчику квитанцию малого размера δ , которая может пересылаться в обратном потоке. Если они достаточно длинные, то это вносит дополнительную задержку. Находятся показатели качества канала как системы массового обслуживания $M/G/1$. Определяется степень влияния вероятности ошибки кадра и длины окна передачи на средние значения: числа кадров в системе, времени пребывания кадра в системе, времени пребывания кадра в очереди, определенные для приоритетных и неприоритетных кадров.

Предложена *модель* для расчета ВВХ и надежностных характеристик канала ПИК. Канал сети ПИК соединяет два маршрутизатора. Первый из них принимает входные данные и если он работоспособен, то передает кадр в линию. Второй маршрутизатор просто принимает данные. Входной маршрутизатор характеризуется коэффициентом готовности к обработке кадров. При неготовности маршрутизатора выполняется его восстановление за время, характеризуемое экспоненциальным распределением с интенсивностью ρ , после чего предпринимается новая попытка передачи. Допустимое число попыток восстановления устройства равно n . Время передачи кадра через линию связи характеризуется экспоненциальным распределением с параметром λ . Допустимое число повторных передач равно m . Модель, отражающая процесс передачи кадра, изображена на рисунке 2.

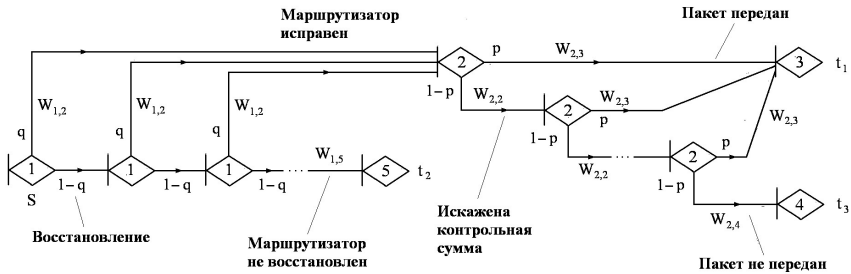


Рисунок 2 – GERT-модель процесса передачи кадра

Случаю успешной передачи соответствует путь от узла 1 до узла 3 с эквивалентной W -функцией GERT-сети:

$$W_{E1,3}(s) = q \frac{1 - (1-q)^{n+1} \rho^{n+1} / (\rho - s)^{n+1}}{1 - (1-q)\rho / (\rho - s)} \cdot p \frac{1 - (1-p)^{m+1} \lambda^{m+1} / (\lambda - s)^{m+1}}{1 - (1-p)\lambda / (\lambda - s)}.$$

Вероятность успешного достижения кадра выхода 3 $P_{1,3} = W_{E1,3}|_{s=0} = [1 - (1-q)^{n+1}] [1 - (1-p)^{m+1}]$, где $1 - (1-q)^{n+1}$ и $1 - (1-p)^{m+1}$ – соответственно вероятности готовности маршрутизатора и

успешной передачи кадра. Среднее время прохождения пути из узла 1 в узел 3 определяется выражением $\bar{t}_{1,3} = \partial W_{E1,3}(s) / \partial s|_{s=0} = \bar{t}_I + \bar{t}_{II}$. Здесь

$$\bar{t}_I = [(1-q)/\rho q] \cdot [1 - (1-q)^{n+1} - (n+1)q(1-q)^n] \text{ и}$$

$$\bar{t}_{II} = (p/\lambda) + [(1-p)/p\lambda] [1 - (1-p)^{m+1} - (m+1)p(1-p)^m] -$$

соответственно средние длительности определения готовности маршрутизатора и передачи кадра по линии связи.

Найдены дисперсии времени контроля маршрутизатора σ_I^2 и времени передачи кадра по линии связи σ_{II}^2 . Определены: допустимое число попыток восстановления входного маршрутизатора, допустимое число повторений передачи кадра через линию связи, вероятность успешной передачи кадра, распределение времени передачи кадра.

Рассматривается *метод* нахождения ВВХ процесса передачи кадров в системах передачи данных с отказами и восстановлениями. Используются модели с произвольным числом петель первого порядка и алгоритмы с полиномиальной вычислительной сложностью. Находятся распределения времени передачи кадров по каналу при различных значениях вероятностей отказов оборудования и операций восстановления работоспособности канала. Рассчитываются характеристики канала, представляемого системой массового обслуживания $M/G/1$. Определяются значения времени выполнения операций восстановления оборудования, обеспечивающие минимально допустимые значения задержки передаваемого по каналу кадра. Модель с операциями восстановления изображена на рисунке 3.

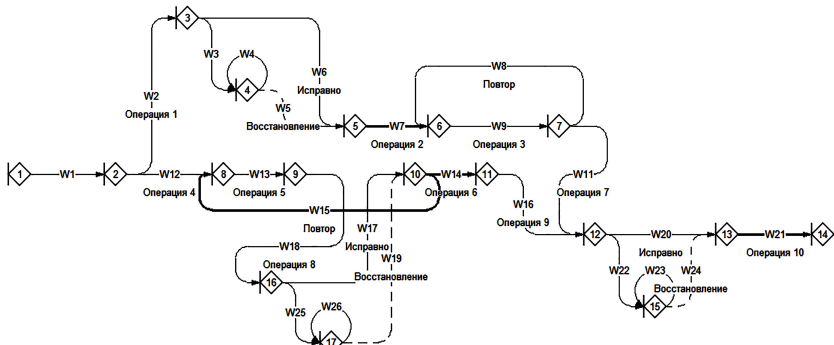


Рисунок 3 – Модель передачи кадра с отказами и восстановлениями

Модель содержит петли первого порядка: (4, 4), (15, 15), (17, 17), (6, 7, 6), (8, 9, 16, 10, 8), (8, 9, 16, 17, 10, 8). Используются упрощающие преобразования структуры модели, так как они не «чувствительны» к числу петель первого порядка. При увеличении вероятности отказа и

уменьшении вероятности выполнения операций восстановления дисперсия значительно увеличивается. Это приводит к ухудшению характеристик узла коммутации, который описывается СМО $M/G/1$, с пуассоновским входящим потоком при времени обслуживания, задаваемом GERT-сетью. За счет изменения входных данных СМО $M/G/1$ решается задача определения нормативного времени восстановления отказавшего узла. Среднее время ожидания кадра в очереди на обслуживание коммуникационного узла \bar{W} определяется формулой Поллачека – Хинчина: $\bar{W} = \rho \bar{X} (1 + C^2) / [2(1 - \rho)]$, где \bar{X} – среднее время передачи кадра через коммутационный узел (без учета времени ожидания в очереди), $C^2 = \sigma^2 / m^2$ – квадрат коэффициента вариации времени передачи кадра, $\rho = \lambda \bar{X}$ – нагрузка обслуживающего прибора. На рисунке 4 приведены зависимости $W = f(\rho)$ при коэффициенте готовности узлов и операций их восстановления, равных 0,99 (кривые 1-3) и 0,9 (кривые 4-6).

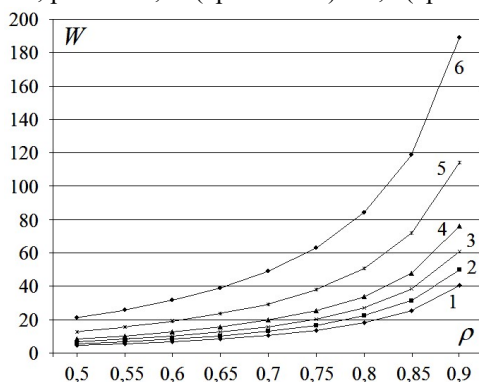


Рисунок 4 – Зависимости $W = f(\rho)$

При $\rho \rightarrow 1$ среднее время пребывания кадра в очереди резко возрастает.

Предлагается **численный метод** повышения отказоустойчивости систем ПИК, основанный на установке контрольных точек (КТ) в программах.

В отличие от известного прототипа снимаются ограничения на структуру сети. Первый, более высокий, уровень иерархии образуется заданием $s-t$ -пути множеством последовательно проходимых доминаторов. Они соединены дугами, имеющими в терминологии теории GERT-сетей статус эквивалентных. На втором, более низком, уровне выполняется детализация системы. Выполнение эквивалентных упрощающих преобразований характеризуется полиномиальной вычислительной

сложностью. Использование доминаторов и соединяющих их эквивалентных дуг объясняется заданием траектории движения системы от входа к выходу. Детализация эквивалентных дуг первого уровня иерархии выполняется для организации нескольких КТ. При этом уменьшается интервал выдержки сторожевого таймера (СТ), сокращается время неработоспособности микроконтроллера в случае его заикливания или «зависания». В модели проходятся различные фрагменты между i -й и $i+1$ КТ. Каждому такому фрагменту назначается свой интервал выдержки T_i СТ. Выбирается среднее значение интервала выдержки \bar{T}_i СТ всех контролируемых фрагментов сети.

В **четвертой главе** подтверждена корректность теоретических выводов, полученных в главах 2 и 3, путем их сравнения с результатами имитационного моделирования. Предложена методика расчета агрегированных каналов ПИК с учетом времени нахождения кадров в очередях маршрутизаторов.

В **заключении** подведены основные результаты диссертационной работы, даются рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В процессе исследований получены следующие новые научные результаты.

1 Разработан не имеющий аналогов метод корректировки плотности распределения вероятностей времени передачи кадров ИС по выполненным ранее расчетам путем изменения особых точек в контуре Бромвича при изменении числа каналов в пути передачи информации.

2 С использованием генетических алгоритмов решена задача оптимизации полосы пропускания каналов ПИК через сети с двухпутевой двухфазной маршрутизацией и выполнением операций восстановления при отказах (что отличает ее от прототипов).

3 Создана не имеющая прототипов модель передачи потока кадров ИС через несколько каналов сети с разным числом однородных виртуальных соединений в каждом физическом канале.

4 Предложен не имеющий аналогов аналитический метод теории GERT-сетей для нахождения распределения времени передачи кадра от ИС до центра управления испытаниями с двухпутевой двухфазной маршрутизацией передаваемой информации и выполнением операций восстановления при отказах оборудования.

5 Разработан численный метод повышения отказоустойчивости сетевого оборудования на основе определения мест установки КТ в программах, в котором, в отличие от прототипа, учитывается текущее состояние программы и за счет этого уменьшаются значения интервалов выдержки СТ, а соответственно время их реакции на отказы оборудования.

6 Создана методика моделирования полосы пропускания сети передачи данных ИС с учетом задержки кадров в очередях маршрутизаторов, в которой, в отличие от прототипов, применяется визуально-ориентированное представление объектов имитации на втором, более высоком уровне моделирования, с использованием выборочных значений случайных величин, полученных на первом уровне в результате расчета GERT-сетей.

7 Разработана и зарегистрирована в Федеральной службе по интеллектуальной собственности (Роспатент) программа планирования полосы пропускания каналов сети передачи кадров ИС при проведении испытаний ЛА.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК

1. Фам, Х.Л. Нахождение характеристик канала передачи данных опто-электронных средств [Текст] / В.П. Корячко, А.П. Шибанов, Х.Л. Фам // Вестник РГРТУ. – 2015. – № 1 (выпуск 51). – С. 30-34.

2. Фам, Х.Л. Нахождение характеристик агрегированного канала передачи измерительной информации [Текст] / В.П. Корячко, А.П. Шибанов, А.Н. Сапрыкин, Х.Л. Фам // Вестник РГРТУ. – 2015. – № 4 (выпуск 54). – С. 72-77.

3. Фам, Х.Л. Планирование полос пропускания сетевых каналов при проведении летных испытаний изделий [Текст] / В.П. Корячко, А.П. Шибанов, А.Н. Сапрыкин, Х.Л. Фам // Вестник РГРТУ. – 2016. – № 2 (выпуск 56). – С. 52-57.

4. Фам, Х.Л. Планирование полосы пропускания сетевых каналов полигонного измерительного комплекса [Текст] / В.П. Корячко, А.П. Шибанов, А.Н. Сапрыкин, Х.Л. Фам // Радиотехника. – 2016. – № 11. – С. 103-110.

5. Фам, Х.Л. Модель канала передачи данных с обнаружением отказов и восстановлением работоспособности [Текст] / В.П. Корячко, А.П. Шибанов, Х.Л. Фам // Вестник РГРТУ. – 2016. – № 4 (выпуск 58). – С. 37-41.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016660314, Российская Федерация. Программа оптимизации сети передачи данных при проведении летных испытаний изделий [Текст] / В.П. Корячко, А.П. Шибанов, А.Н. Сапрыкин, Х.Л. Фам. Зарегистрировано в РОСПАПЕНТ 13.09.2016, заявка № 2016617660.

Статьи в сборниках научных трудов

7. Фам, Х.Л. Использование параллельных генетических алгоритмов для определения структуры локальной сети с технологией коммутации [Текст] / А.Н. Сапрыкин, Х.Л. Фам // Информационные технологии: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань: РГРТУ, 2014. – С. 116-121.

8. Фам, Х.Л. Нахождение характеристик канала передачи данных опто-электронных средств с передачей квитанций в обратном потоке [Текст] / А.П. Шибанов, Х.Л. Фам // Информационные технологии: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань: РГРТУ, 2015. – С. 120-127.

9. Фам, Х.Л. Имитационное моделирование агрегированного канала передачи измерительной информации [Текст] / А.П. Шибанов, Х.Л. Фам // Информационные технологии: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань: РГРТУ, 2016. – С. 167-173.

10. Фам, Х.Л. Имитационное моделирование системы передачи измерительной информации [Текст] / Т.Ф. Нгуен, А.П. Шибанов, Х.Л. Фам // Информационные технологии: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань: РГРТУ, 2017. – С. 82-90.

Тезисы докладов конференций

11. Фам, Х.Л. Применение теории массового обслуживания для определения характеристик специализированного канала передачи опто-электронной информации [Текст] / Х.Л. Фам // Наука и образование в жизни современного общества: сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч.-практ. конф.: в 14 т. – Тамбов, 2015. – Т. 8 – С. 152-153.

12. Фам, Х.Л. Многопутевые протоколы управления трафиком в сетях передачи данных [Текст] / Х.Л. Фам // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XX юбилейной Всероссийской науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов / Рязан. гос. радиотехн. ун-т. – Рязань, 2015. – С. 161-163.

13. Фам, Х.Л. Канал передачи данных с восстанавливаемым маршрутизатором [Текст] / В.П. Корячко, А.П. Шибанов, Х.Л. Фам // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-28: сб. трудов XXVIII Междунар. науч. конф.: в 12 т. / Рязан. гос. радиотехн. ун-т. – Рязань, 2015. – Т. 7 – С. 320-325.

14. Фам, Х.Л. Моделирование канала передачи опто-электронных данных [Текст] / А.П. Шибанов, А.Н. Сапрыкин, Х.Л. Фам // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2016: сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.: в 4 т. / Рязан. гос. радиотехн. ун-т. – Рязань, 2016. – Т.1 – С. 138-142.

Фам Хоанг Лонг

**МОДЕЛИ, МЕТОДЫ И ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА
ПОЛОСЫ ПРОПУСКАНИЯ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 03.07.2017. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.