

На правах рукописи



ШАХТУРИН Денис Владимирович

**ФРАКТАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ
ДИНАМИКИ ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖЕК СООБЩЕНИЙ И ЕЕ СВЯЗИ С
ТОПОЛОГИЕЙ БОЛЬШИХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ**

Специальность

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Уфа – 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ” на кафедре радиоэлектроники и информационно-измерительной техники.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Евдокимов Юрий Кириллович

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Багманов Валерий Хусаинович
ФГБОУ ВПО “Уфимский государственный авиационный технический университет”,
профессор кафедры телекоммуникационных систем

доктор физико-математических наук, профессор
Карпов Аркадий Васильевич
ФГАОУ ВПО “Казанский (Приволжский) федеральный университет”, отделение
Радиофизики и телекоммуникаций, профессор
кафедры радиофизики

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова”

Защита состоится 19 декабря 2013 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.288.07 при ФГБОУ ВПО “Уфимский государственный авиационный технический университет” в актовом зале 1-го корпуса по адресу: 450000, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО “Уфимский государственный авиационный технический университет”.

Автореферат разослан “___” _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент



И.Л. Виноградова

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современные инфокоммуникационные сети представляют собой большие системы со сложной разветвленной топологической структурой и огромным количеством подсистем, элементов и связей. Топология больших сетей обуславливает ключевые системные свойства: надежность, живучесть, динамику (быстродействие), производительность, пропускную способность и т.д. Дальнейшее развитие больших сетей идет по пути еще большего усложнения и большей глобализации, интеграции разнородных сетей (например, мобильных телефонных сетей с глобальной сетью Интернет и т.п.).

В связи с этим развитие и применение новых математических методов оценки основных количественных и качественных показателей больших систем и сетей, основанных на анализе их топологической структуры и изучении ее влияния на свойства сетей, имеет большой теоретический и практический интерес.

Поэтому актуальными становятся задачи анализа сложных коммуникационных систем и сетей на системном уровне, не прибегая к детальным описаниям, и изучения их новых особенностей, обусловленных в основном большими размерами и сложной геометрией или топологией.

Степень разработанности темы.

Одним из основных методов исследования телекоммуникационных систем и сетей, обеспечивающим решение широкого класса задач анализа и проектирования, является математическое моделирование. Несмотря на значительные успехи, достигнутые в разработке математических моделей ни в одном направлении не удается создать абсолютно адекватную, универсальную и достаточно эффективную математическую модель больших пространственно-распределенных телекоммуникационной системы или сети.

Впервые предложен системный подход при исследовании коммуникационных систем и сетей, основанный на применении методов фрактальной геометрии, позволяющий количественно выразить системные свойства сети и найти общие закономерности движения трафика как функцию топологической размерности.

Приложение методов фрактальной геометрии к большим телекоммуникационным системам и сетям дает возможность предложить оптимальные, с точки зрения качества обслуживания и повышения эффективности использования, технические решения при модернизации существующих систем и сетей, с целью предсказания их развития, и проектировании новых.

Изложенное выше образует исходные идеи и задачи, составляющие основу предмета исследований и целей данной работы.

Объект исследования – пространственно-распределенные большие коммуникационные системы и сети различной топологии и природы.

Предмет исследования – выявление и оценка топологической зависимости статистической динамики времени задержек сообщений в больших коммуникационных системах и сетях.

Целью исследования является установление количественной зависимости между топологией и динамическими сетевыми процессами в больших коммуникационных системах и сетях, позволяющей осуществлять как количественное сравнение и анализ существующих систем и сетей, так и синтез новых с заданными системными свойствами.

Основные задачи, которые требовали решения и определили структуру данной работы:

1. Разработка и исследование методики фрактального описания и анализа топологий больших коммуникационных систем и сетей.

2. Разработка математической модели статистической динамики прохождения сообщений в телекоммуникационных системах и сетях.

3. Разработка методики экспериментального исследования связи статистической динамики времени задержек сообщений с топологией больших телекоммуникационных систем и сетей.

4. Проведение экспериментального исследования статистической динамики задержек сообщений в больших телекоммуникационных системах и сетях.

Научная новизна полученных результатов.

1. Предложен новый подход, основанный на концепциях фрактальной геометрии, позволяющий описывать, анализировать и количественно сравнивать большие коммуникационные системы и сети.

2. Предложен фрактальный критерий оптимального согласования топологий больших коммуникационных систем и сети с геометрией объектов, на которых они размещаются.

3. Разработана математическая модель статистической динамики прохождения сообщений в телекоммуникационных системах и сетях на основе модифицированного уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова в рамках дробных производных по пространственным и временным переменным, отличающаяся от известных тем, что учитывает фрактальный характер топологической структуры и процессов в телекоммуникационных системах и сетях.

4. Получены количественные соотношения для скорости и времени доставки сообщений в больших телекоммуникационных системах и сетях.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

Построение математической модели динамической сетевой среды представляет большой теоретический и практический интерес как при анализе существующих больших телекоммуникационных систем и транспортных сетей, так и при создании современной инфокоммуникационной среды.

Результаты работы использованы при разработке и создании многоканальной автоматизированной телекоммуникационной системы дистанционного управления экспериментом в Центре дистанционных автоматизированных учебных лабораторий Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева-КАИ.

Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе на кафедре радиоэлектроники и информационно-измерительной техники института Радиоэлектроники и телекоммуникаций Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева-КАИ.

Методология и методы исследования. В работе использовались теоретические и экспериментальные методы исследований из областей математической физики, теории колебаний, математического анализа, дифференциального исчисления, дробного интегро-дифференцирования, математической статистики, теории систем массового обслуживания, в том числе методы оценивания параметров, численные методы моделирования.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Фрактальный подход, позволяющий анализировать и количественно сравнивать больших телекоммуникационных систем и сетей.

2. Фрактальный критерий оптимального согласования топологий больших коммуникационных систем и сети с геометрией объекта, на котором они размещаются.

3. Математическая модель статистической динамики прохождения сообщений в больших телекоммуникационных системах и сетях на основе модифицированного уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова в рамках дробных производных по пространственным и временным переменным, отличающаяся от известных тем, что учитывает фрактальный характер топологической структуры и процессов в телекоммуникационных системах и сетях.

4. Количественные соотношения для скорости доставки и времени задержек сообщений в больших телекоммуникационных системах и сетях.

5. Экспериментальные исследования статистической динамики времени задержек сообщений и динамики движения на примере сети Интернет, системы цифровой мобильной связи в условиях городской застройки и железнодорожной сети России.

Достоверность и обоснованность результатов обусловлены корректным использованием существующего и разработанного математического аппарата, методов статистического анализа и подтверждается соответствием результатов экспериментального исследования, полученных в диссертационной работе, теоретическим положениям.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Республиканском научном семинаре “Методы моделирования” (Казань, 28 марта 2007 г., 8 декабря 2010 г., 25 мая 2011 г.); Международной научно-технической конференции “Информационные системы и технологии” (Н. Новгород, 20 апреля 2007 г.); Всероссийской научной конференции “Информационные технологии в науке, образовании и производстве” (Казань, 30-31 мая 2007 г.); IV Международной конференции “Методы и средства управления технологическими процессами” (Саранск, 24-26 октября 2007 г.); XV, XVI, XVII, XVIII Международных молодежных научных конференциях “Туполевские чтения” (Казань, 9-10 ноября 2007 г., 28-29 мая 2008 г., 26-28 мая 2009 г., 26-28 мая 2010 г.); IX, XII Международных научно-технических конференциях “Проблемы техники и технологий телекоммуникаций” (Казань, 25-27 ноября 2008 г., 21-24 ноября 2011 г.); VII научно-практической конференции “Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments” (Москва, 28-29 ноября 2008 г.); VIII, IX, X Всероссийских научно-практических конференциях “Динамика нелинейных

дискретных электротехнических и электронных систем” (Чебоксары, 5-6 июня 2009 г., 5-8 октября 2011 г., 6-8 июня 2013 г.); VIII, IX Международных научно-практических конференциях “Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments” (Москва, 20-21 ноября 2009 г., 3-4 декабря 2010 г.); VII, VIII Всероссийских научно-технических конференциях “Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике” (Чебоксары, 3-5 июня 2010 г., 7-9 июня 2012 г.); X Международная научно-практическая конференция “Инженерные, научные и образовательные приложения на базе технологий National Instruments” (Москва, 8-9 декабря 2011 г.); XI Международная научно-практическая конференция “Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments” (Москва, 6-7 декабря 2012 г.).

Теоретические и практические результаты работы использованы при выполнении:

1. НИР “Разработка научных основ создания новых методов и устройств на основе фрактальных структур” по аналитической ведомственной целевой программе “Развитие научного потенциала высшей школы (2010-2014 годы)” на 2010-2011 годы, тематический план № 1.8.10 (№ ГР 01201055182, инв. № 02201255861 ЦИТиС от 26.03.2012).

2. НИР “Разработка теоретического обеспечения задач опознавания объектов на основе посткорреляционных и нелинейных моделей и методов” по аналитической ведомственной целевой программе “Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 годы)” на 2011 год, № 2.1.2/13484 (№ ГР 01201162686, инв. № 02201256616 ЦИТиС от 09.04.2012).

3. НИР “Разработка теоретического и алгоритмического обеспечения интегрированного комплекса моделирования специализированных программно-определяемых радиоэлектронных инфокоммуникационных систем” на основании государственного заказа Министерства образования и науки РФ на 2012-2014 годы (№ ГР 01201259881).

Публикации. Основные научные и практические результаты диссертационной работы опубликованы в 30 печатных работах, в том числе 6 статей (из них 5 – в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки РФ), 3 коллективные монографии и 21 тезис докладов в материалах и трудах научных конференций международного и российского уровня. Получены 2 Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Работа изложена на 112 страницах и содержит 16 рисунков. Список литературы включает 176 наименований.

II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении дана общая характеристика диссертационной работы. Обоснована актуальность темы, раскрыты научная новизна и практическая

значимость работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту. Описана структура диссертации и приведено ее краткое описание.

В первой главе проанализированы традиционные методы исследования телекоммуникационных систем и сетей, рассмотрено современное состояние быстро развивающегося нового фундаментального направления – теории фракталов и дробных операторов применительно к телекоммуникационным технологиям. В заключительной части главы сформулирована цель и определены задачи исследования.

Во второй главе рассмотрено количественное описание топологии больших коммуникационных систем и сетей методами фрактальной геометрии.

Современные коммуникационные системы и сети представляют собой сложные организационно-технические системы, характеризующиеся высокой размерностью в целом и неоднородность отдельных элементов, динамическим характером функционирования, стохастичностью протекающих в них информационных процессов и др. Вместе с тем, географически сложившаяся неоднородность коммуникационных систем и сетей усложняет анализ и определение общих закономерностей движения информационных потоков данных, протекающих в данных системах и сетях.

Можно утверждать, что свойства больших коммуникационных систем и сетей главным образом зависят от геометрии или топологии. При этом одной из фундаментальных характеристик данных систем и сетей является их топологическая размерность D_c . Поэтому множество свойств сетей зависят от размерности D_c , и эту зависимость можно выразить функциональным соотношением вида “свойство сети = $f(D_c)$ ”. Подсчитав размерность топологии сети D_c , можно количественно выразить, например, системные свойства сети и найти общие информационные закономерности движения потоков данных как функцию $f(D_c)$.

Размерность топологии сложных систем и сетей нельзя вычислить, используя обычную евклидову размерность, имеющую только целочисленные значения. На практике рассматриваемые большие сети, несмотря на их внешне нерегулярную структуру, характеризуются некоторым основополагающим порядком, обусловленным внешними ограничениями и моделью их роста. Данное обстоятельство позволяет использовать метод определения размерности топологии этих сетей, основанный на приложении свойства самоподобия, присущего фракталам.

Системы и сети коммуникаций (транспортные сети, сети сотовых станций и других телекоммуникаций и т.д.) обуславливают развитие и рост городов, причем с сильной обратной связью. Следовательно, геометрия городских застроек, имеющих тесную корреляционную связь с географической геометрией улиц и районов, непременно обуславливает топологию систем и сетей коммуникаций. Так, топология сети сотовой связи в масштабе отдельного городского района подобна топологии сети городского масштаба, а топология городской сети – топологии сети регионального масштаба (и т.д., по восходящей иерархии масштабов). С топологических позиций, коммуникационные системы и сети можно рассматривать как совокупность большого числа распределенных точек (коммуникационных узлов), взаимодействующих между собой через каналы

связи. При этом топологии больших коммуникационных систем и сетей представляют собой случайный фрактал, поскольку ее малая часть подобна целой. Следовательно, узлы коммуникационных систем и сетей можно рассматривать как множество точек, вложенных в пространство. Размерность этой совокупности точек имеет дробную размерность, или фрактальную размерность.

Проведен расчет фрактальной размерности топологий, содержащих различное количество точек (коммуникационных узлов). Полученные результаты позволили выявить следующие свойства фрактального описания топологий коммуникационных систем и сетей:

- фрактальная размерность топологии коммуникационных узлов меньше евклидовой размерности D_E ($D_E = 2$) области вложения;
- по мере приближения фрактальной размерности к евклидовой, коммуникационные узлы более равномерно покрывают область вложения;
- при возрастании межузлового расстояния фрактальная размерность топологии коммуникационных узлов асимптотически уменьшается ($D_F \rightarrow 0$), что эквивалентно “стягиванию” узлов сети в одну “большую” точку по отношению к области вложения. При уменьшении расстояния размерность топологии коммуникационных узлов асимптотически стремится к евклидовой размерности ($D_F \rightarrow D_E$).

Также было отмечено, что большему уменьшению фрактальной размерности с возрастанием межузлового расстояния соответствует топология, содержащая большее количество коммуникационных узлов. Данное обстоятельство вызвано влиянием границы области вложения. С увеличением количества коммуникационных узлов число, размещенных вблизи границы, возрастает, что снижает общую фрактальную размерность. Следовательно, нужной “информативности” топологии коммуникационной системы или сети, при заданном межузловом расстоянии, можно добиться при меньшем числе коммуникационных узлов.

Таким образом, показано что, не всегда большее количество коммуникационных объектов (например, узлов сети сотовых станций) означает высокую информативность. Поэтому, важно иметь оптимальную топологию сети, согласованную с топологией объекта (район города, город, регион и т.д.), на которой она размещается, и обеспечивающую необходимую размерность при заданном значении межузлового расстояния.

Для оптимального покрытия объекта сложной коммуникационной сетью ее топология должна быть согласована с топологией объекта, т.е. должно выполняться соотношение

$$D_c \geq D_0, \quad (1)$$

где D_c – фрактальная размерность топологии сложной сети, D_0 – фрактальная размерность геометрии объекта (район города, город, регион и т.д.).

Предложенный фрактальный критерий оптимального согласования топологий коммуникационной сети и объекта, на котором она размещается, позволяет утверждать, что большое или избыточное количество узлов сети не гарантирует их оптимальную “распределенность” на топологии объекта без учета фрактальности его геометрии. Таким образом, оптимальное покрытие топологии объекта сетью коммуникационных узлов возможно на основе фрактальной

размерности как количественной меры “распределенности” топологии больших коммуникационных систем и сетей. При этом оптимальное покрытие топологии объекта сетью коммуникационных узлов должно осуществляться последовательно по определенному закону, обеспечивающему по возможности максимальное приращение размерности ΔD на каждом шаге $\Delta D = D_{i+1} - D_i$.

Результаты проведенного моделирования различных топологий произвольного, нерегулярного (случайного) расположения объектов на плоскости показали, что на некотором шаге покрытия фрактальная размерность достигает максимального значения, которое превышает общую размерность топологии коммуникационных узлов. Следовательно, можно обойтись меньшим количеством коммуникационных узлов при сохранении информативности для заданного межузлового расстояния. Уменьшение фрактальной размерности на последующих шагах объясняется эффектами “близости”, поскольку увеличивается доля “неэффективных” коммуникационных узлов, размещенных на расстояниях меньших межузлового, а также влиянием границы области объекта.

В третьей главе предложена математическая модель статистической динамики прохождения сообщений в сетевой среде на основе модифицированного уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова в дробных производных по пространственным и временным переменным.

Передачу и прохождение сообщений через сетевую среду можно рассматривать как процесс распространения сообщения через фрактальную среду, основной системной и количественной характеристикой которой является фрактальная размерность D_F . Движение сообщения в сетевой среде во времени сопровождается ожиданиями обслуживания в узловых точках, различными прерываниями, т.е. процесс доставки сообщения до получателя протекает во времени разрывами и неоднородно, с “зависаниями” и релаксацией сети.

Фрактальность коммуникационной среды и множественность путей доставки и изменчивость маршрутов от загрузки сети приводят к случайному блужданию сообщения в сети. Наличие очередей в узлах и пространственных корреляций формируют временную и пространственную нелокальность динамики процесса передачи сообщения – память и наследственность инфокоммуникационной среды.

Плотность вероятности $p(x, y, t)$ прибытия сообщения в точку (x, y) в момент t в течение интервала времени $t - t_0$

$$p(x, y, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} Q(x - x', y - y', t; t_0) p(x', y', t_0) dx' dy', \quad (2)$$

где $Q(x - x', y - y', t; t_0)$ – плотность вероятности получения сообщения в момент времени t в точке (x, y) из точки (x, y') , где сообщение находилось в момент времени t_0 .

В начальный момент времени $t = 0$ в узле сети $x = 0, y = 0$ генерируется сообщение, плотность вероятности которой представим в виде функции Дирака – $\delta(x, y)\delta(t)$ (рисунок 1).

Тогда динамику плотности вероятности сообщения $p(x, y, t)$ можно описать уравнением типа Фоккера-Планка-Колмогорова, модифицированного в рамках дробных производных по времени и пространственным координатам:

$$\frac{\partial^\beta p(x, y, t)}{\partial t^\beta} = D \cdot \left(\frac{\partial^\alpha p(x, y, t)}{\partial x^\alpha} + \frac{\partial^\alpha p(x, y, t)}{\partial y^\alpha} \right) + \frac{t^{-\beta}}{\Gamma(1-\beta)} \delta(x, y) \delta(t), \quad 1 < \alpha \leq 2, \quad (3)$$

где $\partial^\beta p / \partial t^\beta$ – производная Римана-Лиувилля дробного порядка $0 < \beta \leq 1$.

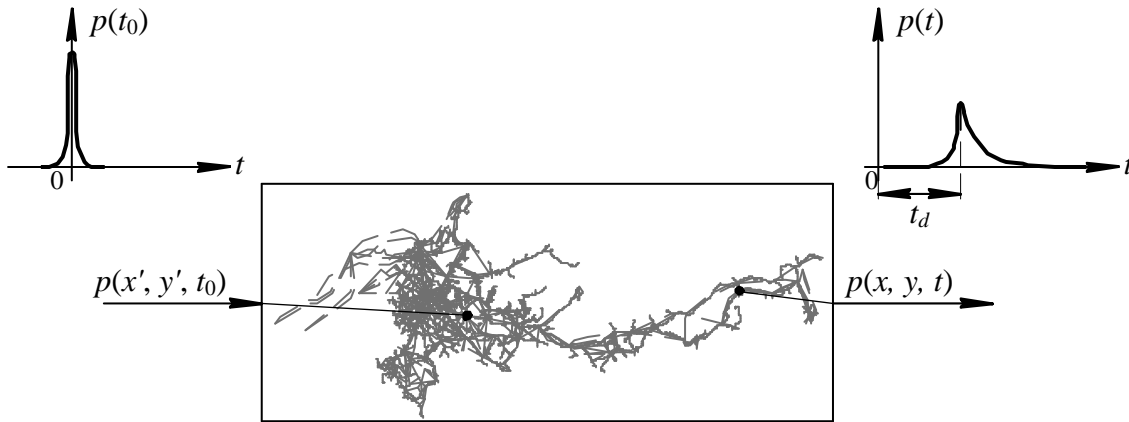


Рисунок 1 – Системное представление передачи сообщений в больших сетях в рамках рассматриваемой модели

При получении (3) было принято допущение о изотропности сетевой среды и пренебрегли членом, описывающим снос в уравнении ФПК.

Преобразованием Фурье $p(x, y, t) \Rightarrow P(jk, jq, j\omega)$ уравнения (3) по времени t и по двум пространственным координатам x и y , получен спектральный эквивалент уравнения (3) для сетевой среды:

$$(j\omega)^\beta P(k, q, \omega) = D \cdot [(jk)^\alpha + (jq)^\alpha] P(k, q, \omega). \quad (4)$$

Из (5) следует дисперсионное соотношение для сетевой среды:

$$\omega^\beta = j^{\alpha-\beta} D \cdot (k^\alpha + q^\alpha). \quad (5)$$

Дисперсионное уравнение вида $\omega = \omega(k)$, где k – волновое число, как известно, выражает причинно-следственную связь частотно-волновых процессов, протекающих в средах с дисперсией. В данном случае из (5) следует, что временной процесс передачи сообщения с частотой ω порождает в коммуникационной сетевой среде пространственное возмущение с волновым числом k и масштабом длины $\lambda = 2\pi/k$. Причем эта связь носит нелинейный и комплексный характер.

Для оценки скорости доставки сообщения в сетевой среде из (5) получено дисперсионное соотношение для модуля $k_{qk} = (k^2 + q^2)^{1/2}$ волнового вектора \vec{k}_{qk} :

$$\omega^\beta = D k_{qk}^\alpha. \quad (6)$$

“Групповая” скорость доставки сообщения в сети определена из (6) как $d\omega/dk$:

$$v_g(k_{qk}) = D^{\frac{1}{\beta}} \frac{\alpha}{\beta} k_{qk}^{\frac{\alpha}{\beta}-1}. \quad (7)$$

Таким образом, скорость доставки сообщения в телекоммуникационной среде с точностью до размерного числового множителя пропорциональна $k_{qk}^{\frac{\alpha}{\beta}-1}$. Соответственно, время задержки сообщения до получения адресатом составит

$t_3 \approx l \cdot k_{qk}^{-\frac{\alpha}{\beta}+1}$. Физический смысл выражения (7) заключается в том, что параметры α и β , входящие в показатель степени, отражают соответственно фрактальную геометрию сети и временную структуру процессов, протекающих во “фрактальном” времени с памятью и последствием (наследственностью). При $\alpha = 2$ и $\beta = 1$ скорость доставки сообщения пропорциональна волновому числу k_{qk} и определяется процессами нормальной диффузии – обычным механизмом расплывания пакета сообщения во времени.

Для $1 < \alpha < 2$ имеем, так называемый супердиффузионный режим, когда процесс переноса сообщения в сети происходит в режиме “Леви-полета” (Levy flights). Маршрут движения пакета сообщения характеризуется разрывами первого рода и длинными скачками в сети. Для качественного пояснения введено нормированное волновое число k_n полагая, что масштаб его значений меняется в диапазоне от малых $k_{qk_{\min}} = 2\pi/l_{\max}$ до больших значений $k_{qk_{\max}} = 2\pi/l_0$:

$$k_n = k_{qk} / k_{qk_{\max}} = l_0 / l, \quad (8)$$

где l_0 играет роль масштаба расстояний между ближайшими соседними узлами сети. Подставляя (8) в (7) получим скорость в относительных единицах с точностью до безразмерного множителя a , который можно определить экспериментально

$$v(k_n) = a \cdot (l_0 / l)^{\frac{\alpha}{\beta}-1}. \quad (9)$$

Из (9) получена оценка относительного времени задержки t_3 сообщений в сети как $(l/l_0)/v$:

$$t_d = b \cdot (l/l_0)^{\frac{\alpha}{\beta}}, b = 1/a. \quad (10)$$

Оценка относительного времени задержки t_3/t_{\max} сообщений в сети приведена на рисунке 2.

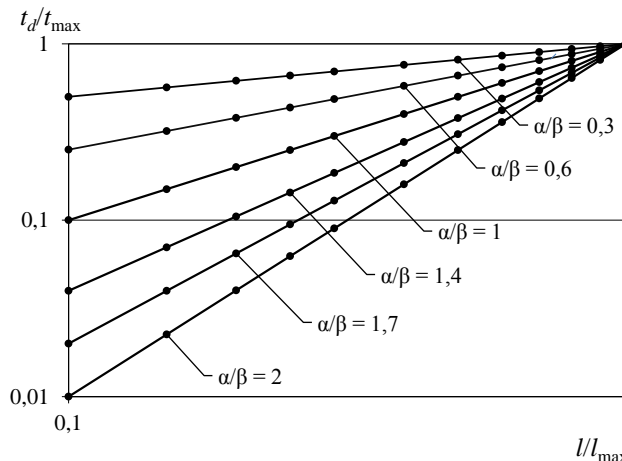


Рисунок 2 – Время доставки (10) сообщений при различных показателях α/β

Как видно из (9), с увеличением межузлового расстояния l_0 скорость доставки сообщений растет по степенной зависимости с показателем $\frac{\alpha}{\beta} - 1$. При асимптотически малых межузловых расстояниях $l_0 \rightarrow 0$ скорость доставки сообщений также асимптотически стремится к нулю, так как длина маршрута из-за

фрактальности возрастает. Соответственно время доставки, как следует из (10), неограниченно растет $t_d \rightarrow \infty$.

При $\alpha = 1$ и $\beta = 1$, что соответствует системе из двух коммуникационных узлов, соединенных каналом связи, время задержки сообщения минимально $t_3 = t_{\min}$ и определяется расстоянием между узлами (рисунок 2). Случай $\alpha = 2$ и $\beta = 1$ соответствует полностью связанной сети, при этом процесс доставки сообщения непрерывный, время задержки сообщений в сети $t_d \sim (l/l_0)^2$. При $1 < \alpha < 2$ процесс движения сообщения в сети характеризуется скачками (разрывами) и зависит от параметра α : чем меньше α , тем больше разрывы. Траекторию (маршрут) доставки сообщения можно представить как совокупность коммуникационных узлов, прошедших сообщением, соединенных каналами связи. Движение сообщения в сетевой среде во времени, сопровождающееся ожиданиями обслуживания в коммуникационных узлах и различными прерываниями ($0 < \beta < 1$), приводит к процессам, протекающим во “фрактальном” времени с памятью и последствием (наследственностью).

В следующей главе проведена экспериментальная верификация полученного количественного соотношения для времени доставки сообщений.

В четвертой главе приведены методика и результаты экспериментального исследования количественной связи статистической динамики времени задержек с фрактальной топологией больших коммуникационных систем и сетей. Для выявления общих закономерностей движения потоков в коммуникационных сетях различной топологии и природы в качестве объектов исследования были выбраны: магистральная сеть связи российских операторов ((сеть Интернет), система цифровой мобильной связи в условиях городской застройки и железнодорожная сеть России. Рассмотренные объекты, несмотря на то, что представляют собой различные функциональные системы, обладают одной общей особенностью – их свойства главным образом зависят от геометрии или топологии. При этом одной из фундаментальных характеристик подобных систем и сетей является их топологическая размерность. Железнодорожная сеть России была выбрана ввиду наиболее подробных и полных сведений о топологической структуре сети, возможных маршрутах движения, расписании и графике движения и т.д.

Проведено численное исследование времени задержек сообщений в глобальной сети Интернет t_I и времени в пути для железнодорожной сети России t_R от их топологической структуры. Время задержки сообщений – время, за которое сообщение проходит путь от его источника через сеть до места назначения (адресата), т.е. время, проводимое сообщением в сети.

Учитывая топологическую неоднородность исследуемых сетей, была разработана методика исследования, состоящая в следующем. Определялись время задержек сообщений t_I и время в пути t_R до мест назначения, расположенных в различных направлениях на расстоянии l относительно пункта отправления, в качестве которого был выбран г. Казань. Для исследования были выбраны 300 мест назначения покрывающие исследуемые сети. Местоположение адресатов и конечных станций соответствовало взаимному географическому расположению узлов магистральной сети связи российских операторов и железнодорожной сети России.

Множественность маршрутов движения до места назначения, относительно выбранного пункта отправления, соответствует множеству значений времени в сети. Поэтому для всех адресатов было определено до 30 IP-адресов. При этом выбор следующего IP-адреса для каждого адресата, по которому будет отправлено сообщение, осуществлялся с равной вероятностью. Наблюдения проводились в рабочие дни с понедельника по пятницу в четыре временных интервала: 8.00-12.00; 12.00-15.00; 15.00-18.00; 18.00-21.00. Для каждого временного интервала выполнялся измерительный цикл, состоящий из 10 серий. В каждой серии осуществлялось последовательное во времени формирование $n = 100$ сообщений, одновременно направляемых всем адресатам. Общий объем экспериментальной статистики составили результаты 200 серий по 100 измерений в каждой.

Методика измерения величины времени задержки сообщений в сети Интернет t_I состояла в фиксации момента t_1 поступления сообщения в сеть и момента t_2 получения сообщения адресатом:

$$t_I = t_2 - t_1. \quad (11)$$

Аналогично, для каждой из выбранных конечных станций, по нескольким маршрутам определялось до 30 значений времени в пути t_R для железнодорожной сети. Здесь под временем в пути t_R понимается время, за которое железнодорожный состав проходит путь из пункта отправления через сеть до места назначения.

Для выявления связи динамики задержек сообщений с топологией больших коммуникационных сетей определена размерность топологий узлов магистральной сети связи российских операторов и железнодорожной сети России. Путем цифровой обработки карт магистральной сети связи российских операторов и железнодорожной сети России были получены подробные топологические структуры сетей. Средний наклон корреляционной функции $C(\varepsilon)$ (рисунок 3, *а*) оказался равным 1,43 что и дает оценку фрактальной размерности $D_I = 1,43$ для системы узлов магистральной сети связи российских операторов. Оценка фрактальной размерности железнодорожной сети России – $D_R = 1,7$ (рисунок 3, *б*).

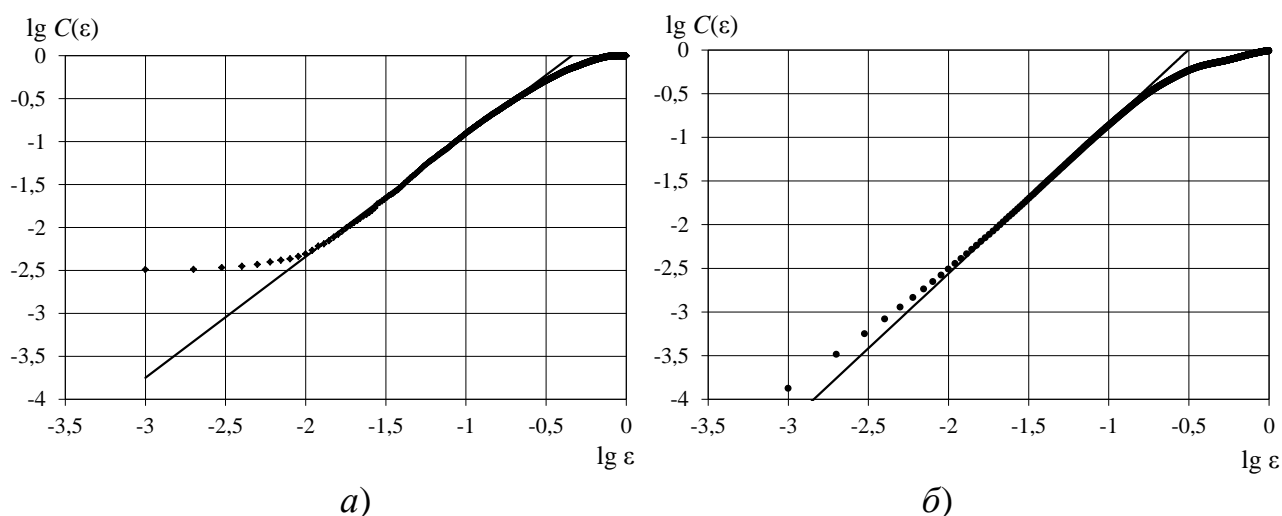


Рисунок 3 – Корреляционная функция $C(\varepsilon)$ от пространственного разрешения ε для магистральной сети связи российских операторов (*а*) и железнодорожной сети (*б*)

Используя полученные оценки задержек t , также было определено среднее

время задержки $t_{\text{mid}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$ (где t_i – время в пути до i -го адресата (станции))

для различных значений относительного расстояния l/l_0 для сети Интернет t_{mid}^I (рисунок 4, а) и для железнодорожной сети t_{mid}^R (рисунок 4, б). Результаты приведены относительно эталонное расстояние $l_0 = 200$ км.

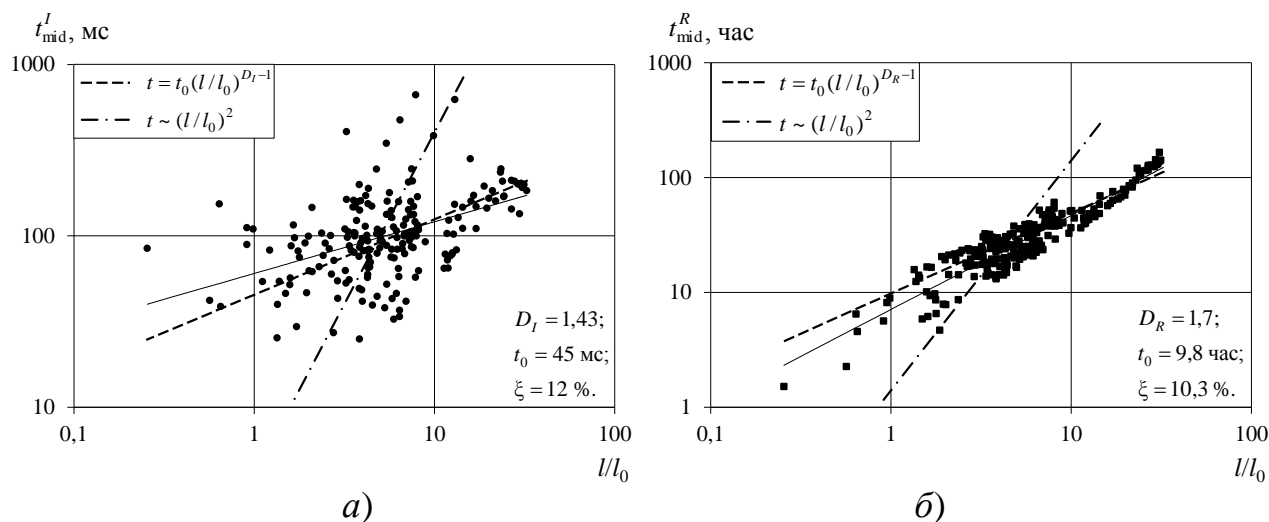


Рисунок 4 – Среднее время в задержек в сети Интернет (а) и среднее время пути в железнодорожной сети (б) от относительного расстояния l/l_0

По графикам (рисунок 4) можно отметить сходство между средним временем задержек сообщений в сети Интернет и средним временем в пути для железнодорожной сети, полученных в результате экспериментальных исследований и теоретических расчетов. Среднее время задержек для обеих сетей, зависит от фрактальной размерности сети D_c с точностью до числового множителя t_0 следующим образом

$$t = t_0 \cdot (l/l_0)^{D_c-1}, \quad (12)$$

где t_0 – числовой множитель, имеющий размерность времени; l – расстояние до места назначения (адресата или конечной станции); l_0 – масштабный коэффициент; D_c – фрактальная размерность сети. По результатам проведенных исследований определено, что числовой множитель t_0 , соответствует времени задержки для расстояния l_0 , т.е. $t_0 = t(l_0)$.

Основываясь на экспериментальных данных независимых авторов¹ установлена связь потерь в тракте систем цифровой мобильной связи $\bar{L}_p(d)$ с топологией городской застройки. На рисунке 5 показана зависимость потерь в тракте от расстояния между передатчиком и приемником d , проведенное в нескольких городах Германии¹

$$\bar{L}_p(d) \sim (d/d_0)^n, \quad (13)$$

¹ Seidel S.Y. et al. Path Loss, Scattering and Multipath Delay Statistics in Four European Cities for Digital Cellular and Microcellular Radiotelephone // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 1991. – Vol. 40. – № 4. – P. 721-730.

где d_0 – эталонное расстояние. Потери в тракте измерялись относительно эталонного расстояния $d_0 = 100$ м.

Для выявления зависимости потерь в тракте от топологии указанных городов была определена их фрактальная размерность. Использовалась топографическая (геоинформационная) карта городской застройки, на которой указаны рельеф местности, контуры зданий, их координаты и высота, представлялся в виде трехмерного массива. Оценка фрактальной размерности городов составила для Штутгарта $D = 2,87$ ($n = 2,81$), Дюссельдорфа – $D = 2,52$ ($n = 2,45$) и Гамбурга – $D = 2,73$ ($n = 2,7$).

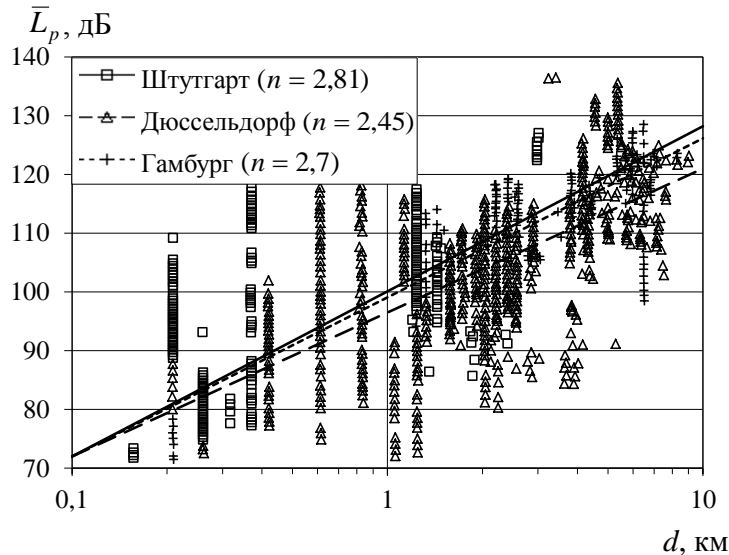


Рисунок 5 – Ослабления в тракте системы цифровой мобильной связи, измеренные для трех городов: Штутгарт, Дюссельдорф и Гамбург

Таким образом, потери в системах цифровой мобильной связи (рисунок 5) зависят от фрактальной размерности, и эта зависимость описывается выражением (13), где показатель степени n в выражении имеет смысл фрактальной размерности $n = D_F$.

В Заключение представлены основные выводы и результаты диссертационной работы.

В Приложениях приведены список адресатов, с указанием географических координат и прямого расстояния от места отправления; исходный текст разработанной программы для ЭВМ и ее функциональных модулей.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложен новый подход, основанный на концепциях фрактальной геометрии, позволяющий описывать распределенные большие коммуникационные системы и сети. Введена основная количественная характеристика сетей – фрактальная размерность, позволяющая анализировать и количественно сравнивать системы и сети различной топологии, предоставляющая необходимую основу для моделирования топологии данных систем и сетей, а также для понимания процессов и явлений происходящих в них. Предложен фрактальный критерий оптимального согласования топологий больших коммуникационных систем и сети с геометрией объекта, на которых они размещаются.

2. Предложена и разработана математическая модель статистической динамики прохождения сообщений в телекоммуникационных системах и сетях на основе модифицированного уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова в рамках дробных производных по пространственным и временным переменным. Получены количественные соотношения для скорости и времени доставки сообщений в больших телекоммуникационных системах и сетях.

3. Разработана методика экспериментального исследования количественной связи статистической динамики времени задержек с фрактальной топологией больших коммуникационных систем и сетей.

4. На основе экспериментального материала верифицировано полученное количественное соотношение для времени доставки сообщений. Сравнение экспериментальной и теоретической зависимостей среднего времени задержек в сети Интернет и среднего времени в пути для железнодорожной сети от относительного расстояния l/l_0 показало совпадение с погрешностью в пределах 12-15 %, что позволяет сделать вывод об адекватности разработанной модели и обоснованность фрактального подхода при оценки системных свойств больших коммуникационных систем и сетей.

Экспериментально установлена функциональная связь потерь в тракте систем цифровой мобильной связи с топологией городской застройки. Подтверждено результатами экспериментальных исследований независимых авторов.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Перспективным направлением для дальнейших исследований является уточнение параметров модели, а именно установление количественной связи между показателем α и фрактальной размерностью сети, а также показателем β и фрактальным характером сетевого трафика.

IV. СПИСОК РАБОТ, ОТРАЖАЮЩИХ ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Всего по теме диссертации опубликовано 30 работ, основные из них:

Публикации в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях:

1. Фрактальное моделирование задержек сообщений в больших сетях / Ю.К. Евдокимов, Д.В. Шахтурин, А.А. Потапов // Нелинейный мир. – 2008. – Т. 6. – № 8. – С. 444-451.

2. Анализ системных свойств больших коммуникационных сетей на примере топологии российских железнодорожных дорог / Ю.К. Евдокимов, Д.В. Шахтурин // Нелинейный мир. – 2010. – Т. 8. – № 5. – С. 297-301.

3. Фрактальные свойства динамики обслуживания в телекоммуникационной системе дистанционного управления экспериментом / А.Ш. Салахова, Д.В. Шахтурин // Нелинейный мир. – 2010. – Т. 8. – № 6. – С. 376-383.

4. Экспериментальное исследование связи динамики задержек сообщений с фрактальной размерностью топологии коммуникационной сети / Д.В. Шахтурин, Ю.К. Евдокимов // Вестник Казанского государственного технического университета имени А.Н. Туполева. – 2011. – № 1(61). – С. 82-88.

5. Фрактальный анализ инфокоммуникационных потоков в больших системах и сетях / Ю.К. Евдокимов, Д.В. Шахтурин // Нелинейный мир. – 2011. – Т. 9. – № 11. – С. 726-734.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

6. Св-во о гос. рег. прогр. для ЭВМ 2011617163, Российская Федерация. Моделирование задержек сообщений в больших телекоммуникационных сетях / Шахтурин Д.В., Евдокимов Ю.К. (РФ); заявитель и правообладатель Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева. – № 2011615323; заявл. 15.07.2011; опубл. 14.09.2011, Бюл. № 4(77). С. 486.

7. Св-во о гос. рег. прогр. для ЭВМ 2011617164, Российская Федерация. Исследование динамики задержек сообщений в больших телекоммуникационных сетях / Шахтурин Д.В. (РФ); заявитель и правообладатель Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева. – № 2011615324; заявл. 15.07.2011; опубл. 14.09.2011, Бюл. № 4(77). С. 486.

Публикации в прочих научных изданиях:

8. Фрактальное моделирование топологии сложных сетей / Ю.К. Евдокимов, Д.В. Шахтурин // Моделирование процессов / под ред. В.А. Райхлина. Труды Казанского научного семинара “Методы моделирования”. – Казань Изд-во КГТУ, 2007. – Вып. 3. – С. 218-232.

9. Методы фрактальной геометрии и дробных операторов в задачах анализа и синтеза сложных систем и устройств / Ю.К. Евдокимов, Е.С. Денисов, Д.В. Шахтурин // Фракталы и дробные операторы / предисловие акад. Ю.В. Гуляева, чл.-кор. РАН С.А. Никотова; под общ. ред. А.Х. Гильмутдинова. – Казань: Изд-во «Фэн» Академии наук РТ, 2010. – Разд. 3 – С. 191-251.

10. Фрактальный анализ флуктуаций и статистической динамики при количественной оценке состояния сложных систем / Ю.К. Евдокимов, Е.С. Денисов, Д.В. Шахтурин [и др.] // Динамические явления в сложных системах / под ред. А.В. Мокшина, С.А. Демина [и др.]. – Казань: Изд-во МОиН РТ, 2011. – С. 103-126.

Публикации в сборниках трудов и материалах конференций:

11. Моделирование топологии больших сетей методами фрактальной геометрии / Ю.К. Евдокимов, Д.В. Шахтурин // Информационные технологии в науке, образовании и производстве: матер. Всерос. науч. конф. (Казань, 30-31 мая 2007 г.). – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2007. – С. 316-319.

12. Фрактальный характер топологии сложных сетей [Текст] / Ю.К. Евдокимов, Д.В. Шахтурин // Методы и средства управления технологическими процессами: матер. IV Междунар. конф.; редкол. И.В. Гуляев (отв. ред.) и др. (Саранск, 24-26 октября 2007 г.). – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2007. – С. 244-251.

13. Связь топологической структуры коммуникационной сети и задержки сообщений / Д.В. Шахтурин // XVI Туполевские чтения: матер. Междунар. молодеж. науч. конф. (Казань, 28-29 мая 2008 г.). – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2008. – Т. 3. – С. 343-344.

14. Фрактальное моделирование задержек сообщений / Ю.К. Евдокимов, Д.В. Шахтурин // Проблемы техники и технологий телекоммуникаций: матер.

IX Междунар. науч.-техн. конф. (Казань, 25-27 ноября 2008 г.). – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2008. – С. 403-404.

15. Системные свойства телекоммуникационных сетей и их экспериментальное исследование / Ю.К. Евдокимов, Д.В. Шахтурин // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: матер. VIII Всерос. науч.-практич. конф. (Чебоксары, 5-6 июня 2009 г.). – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2009. – С. 126-129.

16. Экспериментальное исследование времени задержки в коммуникационных сетях / Ю.К. Евдокимов, Д.В. Шахтурин // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: матер. VII Всерос. науч.-техн. конф. (Чебоксары, 3-5 июня 2010 г.). – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2010. – С. 197-198.

17. Системный анализ сложных коммуникационных сетей / Д.В. Шахтурин // XVIII Туполевские чтения: матер. Междунар. молодеж. науч. конф. (Казань, 26-28 мая 2010 г.). – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2010. – Т. 4. – С. 323-325.

18. Исследование сетевого трафика в больших телекоммуникационных сетях / Ю.К. Евдокимов, Д.В. Шахтурин // Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments: сб. тр. IX науч.-практич. конф. (Москва, 3-4 декабря 2010 г.). – М.: РУДН, 2010. – С. 374-376.

19. Экспериментальное исследование динамики задержек сообщений в коммуникационных сетях / Ю.К. Евдокимов, Д.В. Шахтурин // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: матер. IX Всерос. науч.-практич. конф. (Чебоксары, 5-8 октября 2011 г.). – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2011. – С. 35-36.

20. Фрактальный анализ динамики задержек сообщений в больших коммуникационных сетях / Ю.К. Евдокимов, Д.В. Шахтурин // Проблемы техники и технологий телекоммуникаций: матер. XII Междунар. науч.-технич. конф. (Казань, 21-24 ноября 2011 г.). – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2011. – С. 449-450.

21. Математическая модель статистической динамики движения сообщений в больших телекоммуникационных системах / Ю.К. Евдокимов, Д.В. Шахтурин // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: матер. VIII Всерос. науч.-техн. конф. (Чебоксары, 7-9 июня 2012 г.). – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2012. – С. 3-6.

22. Экспериментальное исследование задержек сообщений больших в телекоммуникационных сетях / Ю.К. Евдокимов, Д.В. Шахтурин // Инженерные и научные приложения на базе технологии National Instruments – 2012: сб. тр. XI Междунар. науч.-практич. конф. (Москва, 6-7 декабря 2012 г.). – М.: ДМК Пресс, 2012. – С. 444-446.

23. Дробно-операторная модель статистической динамики прохождения сообщений в телекоммуникационных системах / Ю.К. Евдокимов, Д.В. Шахтурин // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: матер. X Всерос. науч.-практич. конф. (Чебоксары, 6-8 июня 2013 г.). – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2013. – С. 69-70.

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 1,0. Усл. печ. л. 0,93. Уч.-изд. л. 0,97.

Тираж 100. Заказ Б117.

Типография КНИТУ-КАИ. 420111, Казань, К. Маркса, 10