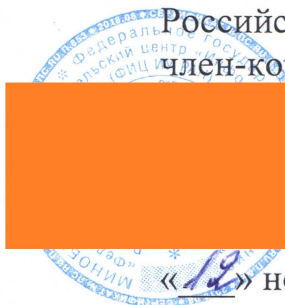


УТВЕРЖДАЮ

Директор
Федерального государственного
учреждения "Федеральный
исследовательский центр
"Информатика и управление"
Российской академии наук",
член-корреспондент РАН



М.А. Посыпкин

«18» ноября 2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного учреждения "Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" Российской академии наук" (ФИЦ ИУ РАН) - на диссертационную работу Гребенщиковой Александры Андреевны на тему «Модели и методы прогнозирования сетевого трафика в гетерогенных сетях с учётом его статистических характеристик», представленную к защите в диссертационном совете Д 55.2.004.01 на базе ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф.М.А.Бонч-Бруевича» (СПбГУТ) на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Актуальность темы диссертационной работы

В современных инфокоммуникационных сетях наблюдается тенденция увеличения объёмов сетевого трафика и значительные изменения в его структуре по сравнению с предшествующими концепциями в рамках развития сетей связи. Анализ и прогнозирование сетевого трафика в гетерогенной сети может

способствовать повышению качества обслуживания и, несомненно, является важным компонентом в вопросах не только проектирования сетей связи, но и в области управления сетевым трафиком.

Большинство исследований по прогнозированию сетевого трафика основаны на традиционных статистических подходах и на алгоритмах с применением искусственных нейронных сетей. Из статистических моделей особое внимание заслуживают модели авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего ARIMA (autoregressive integrated moving average), модели условной гетероскедастичности ARCH-модели (autoregressive conditional heteroskedasticity) и их обобщения GARCH-модели (generalized autoregressive conditional heteroskedasticity). Соискатель в своей работе вносит весомый вклад в развитие области прогнозирования сетевого трафика путем исследования и разработки моделей и методов прогнозирования трафика гетерогенной сети пятого и последующих поколений, что позволяет получить результаты, обеспечивающие уменьшение ошибки прогноза для трафика маломощных систем и повышающие эффективность прогнозирования для трафика трехмерной сети высокой плотности. Исходя из сказанного, тема представленной на отзыв диссертационной работы “Модели и методы прогнозирования сетевого трафика в гетерогенных сетях с учётом его статистических характеристик” является, несомненно, актуальной.

Новизна научных положений, выводов и рекомендаций

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 71 наименования и одного приложения.

Научная новизна диссертационной работы состоит в разработанных моделях и методах прогнозирования трафика, а именно:

– модели ARIMA(1,5,4) для трафика Интернета вещей на краткосрочном периоде, что обеспечило уменьшение средней абсолютной ошибки прогноза более чем в 4 раза по сравнению с использованием исходной модели ARIMA(1,1,2);

– модели ARIMA-GARCH для трафика реального времени с применением преобразования Бокса-Кокса, что позволило уменьшить число параметров при подборе модели и улучшить прогнозирование на 8,5% при прогнозе на один шаг вперед и на 7,6% при прогнозе на два шага вперед.

– модели многомерного случайного процесса для трафика трехмерной сети высокой плотности с применением искусственной нейронной сети, что позволило повысить эффективность прогнозирования до 35 %.

Автор концентрирует внимание на исследовании моделей и методов прогнозирования сетевого трафика как для краткосрочных, так и долгосрочных прогнозов. Благодаря анализу структуры моделей авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего, разработан метод прогнозирования трафика в гетерогенных сетях пятого и последующих поколений на основе модели ARIMA для краткосрочного прогноза. Автором диссертации приведены результаты исследования сетевого трафика на самоподобие и тесты на стационарность тренировочных участков исходного временного ряда, что позволило разработать алгоритм для подбора параметрической модели ARIMA на основе методики Бокса-Дженкинса и информационного критерия Акаике. Предложенная модель ARIMA(1,5,4) обеспечивает уменьшение ошибки точности прогнозирования до 19%, что на 60% меньше чем с использованием исходной модели ARIMA(1,1,2)

На основе исследования структуры гибридной модели ARIMA-GARCH был разработан метод прогнозирования трафика реального времени в гетерогенных сетях пятого и последующих поколений с преобразованием Бокса-Кокса для краткосрочного прогноза. Автором диссертации отмечается важность оценки остатков модели ARIMA с помощью Q-статистики Льюнга-Бокса, теста на гетероскедастичность и на анализ нормальности, что в совокупности с разработанным методом позволяет получить качественный прогноз объемов трафика реального времени на несколько шагов вперед. Таким образом, модель прогнозирования ARIMA(1,2,2)-GARCH(2,0) обеспечила уменьшение ошибки точности прогнозирования на 8,5% при прогнозе на один шаг вперед и на 7,6% при прогнозе на два шага вперед.

В свою очередь модель трафика трехмерной сети связи высокой плотности и разработанный метод прогнозирования с использованием искусственной нейронной сети типа LSTM (Long short-term memory) позволяют повысить эффективность прогнозирования до 35 %. Автором оценивалось изменение ошибки прогнозирования при прогнозировании трафика трехмерной сети связи высокой плотности, как многомерного случайного процесса по сравнению с прогнозированием этого же трафика как множества независимых случайных процессов. Таким образом, трафик трехмерной сети связи высокой плотности в задачах прогнозирования следует рассматривать как многомерный случайный процесс, размерность которого равна количеству узлов сети.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов

Достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций диссертационной работы подтверждается корректным применением математического аппарата, обсуждением результатов диссертационной работы на международных конференциях и семинарах, публикацией основных результатов диссертации в ведущих рецензируемых журналах.

Основные выводы диссертации опубликованы в 5 работах, в том числе в 3 работах в журналах из перечня ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации; 2 работах в других научных изданиях.

Полученные автором результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 10-ой международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (Санкт-Петербург, 24–25 февраля 2021), 11-ой международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (Санкт-Петербург, 15–16 февраля 2022), 27-ой международной конференции «International conference on Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications DCCN» (Москва, 23-27 сентября 2024).

Все основные выводы диссертационной работы получены автором самостоятельно. Исследования проведены под научным руководством автора при

его непосредственном участии. Количество публикаций в рецензируемых научных изданиях, выполненных лично, в которых излагаются результаты научных работ – 2, что соответствует требованиям п. 13 «Положения о присуждении ученых степеней» (утв. Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842).

Значимость для науки и практики результатов, полученных автором диссертации

Несмотря на успехи и преимущества, которые предлагают искусственные нейронные сети в области обработки данных, модель ARIMA остается важным инструментом в анализе временных рядов. Ее интерпретируемость, способность работать с ограниченными данными, а также эффективное моделирование временных зависимостей делают ARIMA незаменимой в ряде приложений. Важно понимать, что выбор между ARIMA и ИНС зависит от конкретной задачи, характеристик данных и целей исследования.

Применение гибридных моделей прогнозирования ARIMA-GARCH подтверждает наличие во временных рядах сетевого трафика реального времени эффектов авторегрессионной условной гетероскедастичности и расширяет существующие знания в области прогнозирования сетевого трафика в гетерогенной сети пятого и последующих поколений на краткосрочном периоде.

Полученные результаты прогнозирования (обеспечение уменьшения средней абсолютной ошибки прогноза и повышение эффективности прогнозирования) для различного трафика гетерогенных сетей пятого и последующего поколений расширяют существующие знания в области прогнозирования сетевого трафика. Прогнозирование сетевого трафика как многомерного процесса с помощью ИНС демонстрирует хорошую точность долгосрочного прогноза, в отличие от параметрических моделей типа ARIMA, которые применяются для краткосрочного прогнозирования одномерных процессов. Эффективность прогнозирования предложенным методом зависит от размерности случайного процесса, возрастая с увеличением размерности.

Исследование трафика трехмерной сети связи высокой плотности и разработка его модели являются критически важными направлениями из-за роста потребления данных и появления новых технологий, таких как 5G (fifth generation — «пятое поколение») и IoT (internet of things). Эффективное управление трафиком становится необходимым для обеспечения высокого качества связи и минимизации задержек, что требует разработки моделей для сложных сетевых структур. Кроме того, прогнозирование трафика позволяет оптимизировать распределение ресурсов и предотвращать перегрузки, что повышает устойчивость сети. В условиях увеличения числа умных устройств в городах исследования в этой области способствуют созданию более эффективных систем управления городской инфраструктурой, что имеет огромное значение для будущего информационных технологий. Вклад в развитие данного направления осуществлен в рамках прогнозирования трафика трехмерной сети связи высокой плотности.

Полученные в диссертационной работе результаты внедрены в ООО «НТЦ СевенТест» в решения серии «Профит», в АО «НПП «Эргоцентр» в ходе выполнения опытно-конструкторской работы, направленной на расширение функциональности комплексного имитационно-моделирующего стенда системы специального назначения в интересах решения задач обоснования системотехнических решений по построению функциональных подсистем и всей системы специального назначения в целом (шифр - «Орфей-Эрго-2014»), в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ) при чтении лекций и проведении практических занятий по курсам «Математическое и программное обеспечение киберфизических систем», а также при выполнении Соглашения о предоставлении из федерального бюджета гранта в форме субсидий, выделяемого для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных организациях высшего образования, научных учреждениях и государственных научных центрах Российской Федерации от «06» июля 2022 г. № 075-15-2022-1137 по приоритетному направлению научно-технологического развития Российской

Федерации 20а - Переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы для оптимизации функционирования системы управления трафиком. Так же полученные результаты могут быть применены в рамках технологий пятого и последующих поколений, для которых актуально не затрачивать большие вычислительные ресурсы. Таким образом, оптимальным способом прогнозирования избыточной нагрузки могут выступать именно аналитические модели. Соответственно, для высокомоощных систем оптимально подойдут решения на основе искусственных нейронных сетей и предложенный в работе метод прогнозирования.

Основные результаты диссертационной работы рекомендуются к использованию при проведении научно-исследовательских работ в области современных телекоммуникационных сетей и систем и при проектировании и планировании современных сетей связи ПАО «ГИПРОСВЯЗЬ», операторскими компаниями ПАО «Ростелеком», ПАО «Мегафон», ПАО «ВымпелКом», ПАО «МТС», а также при подготовке специалистов по современным сетям и системам связи в университетах РФ.

Недостатки работы

1. Стр.11. В рамках обсуждения применимости прогнозных моделей была отмечена одна из концепций сетей пятого и последующих поколений, для которой критически важно за короткий промежуток времени спрогнозировать возможные перегрузки на сети. При этом при упоминании высокомоощных систем, для которых более актуальными могут выступать модели и методы на основе искусственных нейронных сетей, конкретные примеры отсутствуют. Таким образом, требуются пояснения о конкретных технологиях в рамках

высокомощных систем для применения искусственных нейронных сетей в прогнозировании трафика.

2. Стр.26. Для прогнозирования трафика помимо моделей ARIMA могут использоваться другие модели временных рядов, такие как модель SARIMA (season autoregressive integrated moving average). Хотя автором отмечена особенность таких сезонных моделей, в работе было бы полезно указать по какой причине для прогнозирования конкретного трафика не выбрана модель SARIMA (стр.26).

3. В четвертой главе автор приводит ряд аргументов и выводов по вопросам выбора продолжительности интервала прогнозирования и единичного интервала. Действительно, продолжительность интервала прогнозирования и единичных интервалов существенно влияет на результаты прогнозирования. Выбор величины единичного интервала зависит от таких факторов, как параметры канала связи, свойства трафика и характеристики системы управления. Однако, в работе после проведения исследования трафика на самоподобность не хватает уточнения по выбору конкретного периода агрегации данных для различных типов трафика (стр.47, стр.61).

4. Стр.52, Стр.71. Для оценки точности прогноза используется исключительно средняя абсолютная процентная ошибка MAPE (аббр. от англ. mean absolute percentage error). Однако, наряду с MAPE могут использоваться и другие оценки, такие как среднеквадратичная ошибка MSE (аббр. от англ. Mean Square Error), средняя абсолютная ошибка MAE (аббр. от англ. Mean Absolute Error) и др. Таким образом, для получения более качественных результатов необходимо сравнить несколько показателей для оценки прогноза.

5. В работе присутствует ряд опечаток и стилистических неточностей (стр.11), отсутствуют знаки препинания (стр.58, стр.85). Стр.52, Стр.71. На рисунке 13 автор приводит обозначение автокорреляционной функции в виде ACF (autocorrelation function), а в самом тексте АКФ. Так же обозначение аббревиатуры ACF приведено и расшифровано только в следующей главе. Такое же замечание относится и к функции частичной автокорреляции ЧАКФ (partial autocorrelation function, PACF) на рисунке 14.

Заключение

Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Гребенщиковой Александры Андреевны. Диссертация «Модели и методы прогнозирования сетевого трафика в гетерогенных сетях с учётом его статистических характеристик» является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена научная задача, заключающаяся в повышении точности прогнозирования сетевого трафика гетерогенной сети за счет аналитических методов и методов на основе искусственных нейронных сетей, имеющая значение для отрасли цифрового развития и связи, а также специальности 2.2.15. – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Полученные автором результаты отличаются научной новизной и практической значимостью. Результаты апробированы на значимых научных конференциях. Основные научные результаты диссертации достаточно полно опубликованы в ведущих российских изданиях. Название работы полностью отражает ее содержание, содержание диссертации соответствует пунктам 1, 8 и 18 специальности 2.2.15. – Системы, сети и устройства телекоммуникаций. Автореферат адекватно отражает содержание диссертационной работы и ее основные результаты.

На основании изложенного считаем, что диссертация Гребенщиковой Александры Андреевны «Модели и методы прогнозирования сетевого трафика в гетерогенных сетях с учётом его статистических характеристик» соответствует критериям, предъявляемым в отношении кандидатских/докторских диссертаций, которые установлены пп. 9–14 Положения о присуждении ученых степеней (утв. Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842), а ее автор Гребенщикова Александра Андреевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.15. – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Отзыв ведущей организации обсужден и принят на заседании секции Ученого Совета Федерального государственного учреждения "Федеральный

исследовательский центр "Информатика и управление" Российской академии наук" 07 ноября 2024 года, протокол № 5.

Руководитель Отделения 6 ФИЦ ИУ РАН,
главный научный сотрудник,
доктор физико-математических наук
(05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации)

A blue ink signature is written over a solid orange rectangular redaction box.

Синицин Владимир Игоревич

Федеральное государственное учреждение "Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" Российской академии наук" (ФИЦ ИУ РАН)

Адрес: 119333, г. Москва, ул. Вавилова, 44, к.2.

Сайт: <https://www.frccsc.ru/>

Тел.: +7(499) 135-62-60

Эл.почта: frccsc@frccsc.ru