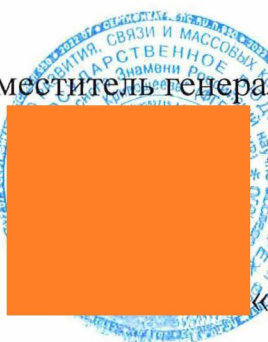


УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора по науке

к.т.н., доцент А.А. Захаров



«19» 9 октября 2024 г.

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Гребенщиковой Александры Андреевны на тему «Модели и методы прогнозирования сетевого трафика в гетерогенных сетях с учётом его статистических характеристик», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Развитие телекоммуникационных технологий и снижение стоимости передачи и обработки информации приводят к постоянному увеличению объёма сетевого трафика. Это предъявляет повышенные требования к сетям передачи данных, алгоритмам управления трафиком и методам борьбы с перегрузками. При наличии мобильных систем в сети число связей может динамически изменяться, что приводит к изменениям маршрутов передачи информации. Это требует моделирования распределения трафика для поддержки процедур управления.

В широком смысле можно рассматривать современные сети связи как гетерогенные, то есть обеспечивающие передачу данных между различными типами абонентских устройств с использованием подсетей, работающих в различных стандартах. Для получения корректных оценок нагрузки и пропускной способности необходимо проводить моделирование таких сетей с трафиком, близким к реальному. При этом можно отметить такие существующие проблемы моделирования гетерогенного трафика:

Неверные решения о маршрутизации. В сети с гетерогенным трафиком стандартизированные целевые функции могут принимать неверные решения о маршрутизации, выбирая уже перегруженный родительский узел, и вызывать больше повторных передач по сети.

Оптимизация распределения ресурсов сети. Поиск нового критерия оптимизации распределения ресурсов в сетях связи для обеспечения

справедливого распределения ресурсов в гетерогенных сетях с учётом требуемого соотношения между сетевыми возможностями и пропускной способностью.

Распределение нагрузки на сеть. Создание эффективных алгоритмов управления информационными потоками с целью снижения нагрузки на сотовую сеть методом перенаправления трафика в сети других технологий радиодоступа.

Для разработки моделей прогнозирования гетерогенного трафика для повышения точности прогнозирования используются и аналитические методы, и методы на основе искусственных нейронных сетей (ИНС). При этом автором для решения задач прогнозирования сетевого трафика в гетерогенных сетях на коротком промежутке выбрана интегрированная модель авторегрессии скользящего среднего (ARIMA, Autoregressive Integrated Moving Average). Она сохраняет свою значимость и продолжает оставаться одним из наиболее широко используемых инструментов для анализа временных рядов и предсказания их значений. Модель ARIMA основана на четких статистических принципах, что делает ее легко интерпретируемой. Она использует стационарные данные, что позволяет эффективно выявлять закономерности и тренды. Модель ARIMA может работать с меньшими выборками данных в сравнении с ИНС, которые требуют больших объемов данных для обучения.

Вопросы исследования моделей и методов прогнозирования сетевого трафика в гетерогенных сетях на менее ресурсозатратных статистических методах представляются весьма *актуальными и востребованными*. Например, для архитектуры граничных вычислений в подвижных сетях связи (MEC - Mobile Edge Computing), характеризующейся наличием маломощных устройств на границе сети, вопрос прогнозирования с применением аналитических моделей может быть критически важным по сравнению с применением методов на основе искусственных нейронных сетей.

Однако, среди методов прогнозирования современного сетевого трафика наибольшее количество исследований приходится на алгоритмы с применением искусственных нейронных сетей. *Особенно актуально* применение методов прогнозирования на основе ИНС для высокомоощных систем и долгосрочных прогнозов. Автором для решения задачи повышения точности прогнозирования в трехмерной сети связи высокой плотности выбрана модель LSTM (Long short-

term memory) благодаря известной особенности таких рекуррентных нейронных сетей улавливать характерные особенности случайных процессов.

Судя по автореферату, диссертация содержит следующие *результаты, обладающие научной новизной*:

1. Разработан метода прогнозирования трафика в гетерогенных сетях пятого и последующих поколений на основе модели авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего для краткосрочного прогноза с параметрами $ARIMA(1,5,4)$, которая обеспечивает уменьшение ошибки точности прогнозирования до 19%, что на 60% меньше чем с использованием исходной модели $ARIMA(1,1,2)$.

2. Разработан метода прогнозирования трафика реального времени в гетерогенных сетях пятого и последующих поколений на основе гибридной модели авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего и обобщенной условной гетероскедастичностью с преобразованием Бокса-Кокса для краткосрочного прогноза с параметрами модели $ARIMA(1,2,2)$ - $GARCH(2,0)$ который обеспечивает уменьшение ошибки точности прогнозирования на 8,5% при прогнозе на один шаг вперед и на 7,6% при прогнозе на два шага вперед;

3. Разработана модель трафика трехмерной сети связи высокой плотности как многомерного случайного процесса и метод прогнозирования с использованием искусственной нейронной сети, которая позволяют повысить эффективность прогнозирования до 35 %.

Можно отметить, что полученные *теоретические результаты* прогнозирования с помощью гибридных параметрических моделей (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 подтвердили высокую точность долгосрочного прогноза, в отличие от параметрических моделей типа $ARIMA$, которые применяются для краткосрочного прогнозирования одномерных процессов. Было показано, что эффективность прогнозирования предложенным методом зависит от размерности случайного процесса, возрастая с увеличением размерности.

К практическим научным результатам следует отнести возможность их использования для оптимизации функционирования системы управления трафиком, а кроме того результаты могут быть применены в сетях передачи данных технологий пятого и последующих поколений, поддерживающих граничные вычисления (edge computing), для которых актуально оптимизация или минимизация используемых вычислительных ресурсов. В этих случаях оптимальным способом прогнозирования избыточной нагрузки могут выступать именно аналитические модели.

Как отмечено в автореферате, материалы диссертации в полном объеме *отражены в публикациях и апробированы как на российских, так и на международных конференциях*. Всего по теме диссертации опубликовано 5 работ, из них 3 статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК Министерства высшего образования и науки Российской Федерации, 2 статьи в других изданиях и материалах конференций.

По автореферату к работе *имеются следующие замечания*:

- В описании результатов второй главы на стр. 8 приводится информация о проведенном анализе трафика Интернета Вещей. Представляется целесообразным дать больше информации о сценарии с Интернетом вещей и о процессе получения трафика для исследования, его объеме и количестве повторов проведенного исследования, что дало бы более полное представление о проведенной автором работе. При этом есть понимание, что большой объем данных не может быть приведен в автореферате.
- В четвертой главе отсутствует явное выделение разработанной модели, что также представлялось бы целесообразным для однозначного соотнесения математических выражений к представляемой модели, в частности, и для более четкого представления работы, проделанной автором, в целом.
- Рисунки 1 и 3 на стр. 7 и 11, соответственно, представляющие алгоритмы (блок-схемы), имеют некоторое размытие в отличии от рис. 12, что затрудняет восприятия представленных на них результатов.

Однако, отмеченные недостатки не являются принципиальными и не снижают ценности полученных автором результатов. Диссертация «Модели и методы прогнозирования сетевого трафика в гетерогенных сетях с учётом его

статистических характеристик» является законченной научно-квалификационной работой, в которой присутствует научная новизна и практическая ценность. Считаю, что работа соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор, Гребенщикова Александра Андреевна, заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Заместитель начальника отдела ФГБУ НИИР,

кандидат технических наук



Е.В. Тонких

телефон: (495) 647-17-77, доб. 1055

e-mail: et@niir.ru

Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение

«Ордена Трудового Красного Знамени Российский

научно-исследовательский институт радио

имени М.И. Кривошеева» (ФГБУ НИИР),

почтовый адрес: Казакова ул., д. 16, Москва, 105064,

e-mail: info@niir.ru, сайт: <http://www.niir.ru>

Подпись Е.В. Тонких заверяю,

Директор службы персонала ФГУП НИИР



В.А. Тютюнова

« 19 » сентября 2024 г.