УДК 681.142.33.681.14

С.А. Агеев, Н.С. Агеева, В.В. Каретников, А.А. Привалов

АДАПТИВНЫЙ МЕТОД И АЛГОРИТМ ОПЕРАТИВНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРАФИКА В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ КОРПОРАТИВНЫХ МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ СЕТЯХ СВЯЗИ

Агеев Сергей Александрович, доктор технических наук, доцент, окончил радиотехнический факультет Ульяновского политехнического института. Начальник научно-исследовательского отдела АО «Радиоавионика», г. Санкт-Петербург. Специализируется в области проектирования телекоммуникационных систем, автоматизированных систем управления связью, а также в области разработки методов и алгоритмов управления сложными системами. Имеет статьи и патенты в области создания телекоммуникационных и мультисервисных систем и сетей связи. [e-mail: serg123_61@mail.ru].

Агеева Нина Сергеевна, окончила инженерно-физический факультет Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики («Университет ИТМО»). Научный сотрудник Военной академии связи им. С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург. Специализируется в области построения автоматизированных систем управления качеством услуг в мультисервисных сетях связи. Имеет статьи и патенты в области методов и алгоритмов сжатия данных в мультисервисных сетях связи. [e-mail: nine11ia@yandex.ru].

Каретников Владимир Владимирович, доктор технических наук, профессор, окончил Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций. Заведующий кафедрой «Судоходство на внутренних водных путях» Государственного университета морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург. Специализируется в области проектирования и создания систем, сетей связи и систем радионавигации. Имеет статьи и патенты в данной предметной области. [e-mail: spguwc-karetnicov@yandex.ru].

Привалов Андрей Андреевич, доктор военных наук, окончил ВАС им. С. М. Буденного. Профессор кафедры «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург. Специализируется в области математического моделирования и разработки методов, алгоритмов и систем управления инфокоммуникационными системами. Имеет статьи и патенты в области оперативного управления сетями связи и большими киберфизическими системами. [e-mail: aprivalov@inbox.ru].

Аннотация

В статье разработаны адаптивный метод и реализующий его алгоритм оперативного оценивания характеристик и параметров трафика в высокоскоростных корпоративных мультисервисных сетях связи. Данный алгоритм функционирует в режиме реального времени.

Высокоскоростные корпоративные мультисервисные сети характеризуются высокой динамикой изменения своего состояния, включая изменения характеристик передаваемого трафика. В этих условиях автоматизированная система управления сетью должна обеспечить требуемое качество предоставляемых пользователям услуг и сервисов связи. Таким образом, актуальность данного исследования определяется необходимостью реализации процессов управления сетью в режиме, близком к реальному времени, с заданным качеством в условиях, динамичных априори неизвестных изменений сетевых характеристик.

Основой предлагаемого метода является концепция условной нелинейной Парето-оптимальной фильтрации В.С. Пугачева, заключающаяся в том, что оценка параметров трафика производится в два этапа: в начале оценивается прогноз значений параметров, а затем, с получением следующих наблюдений параметров, производится их корректировка. Прогнозы параметров трафика производятся в небольшом скользящем окне, а уточнение значений текущих оценок параметров трафика реализуется псевдоградиентными процедурами, параметры которых регулируются методом нечеткого логического вывода Такаги-Сугено. При этом приращения в псевдоградиентных процедурах вычисляются относительно среднего значения предыдущих оценок, вычисленных также в небольшом скользящем окне. Такой метод позволил снизить значение средней относительной ошибки оценивания параметров интенсивности нестационарного сетевого трафика в 1,4–1,9 раза, а также позволил сократить размер скользящего окна, в котором ведется его обработка от 1,7 до 4,2 раза.

Предложенный метод и алгоритм относятся к классу методов и алгоритмов с предварительным обучением. Средняя относительная погрешность оценки параметров трафика не превышает 7%, что является достаточным значением для реализации задач оперативного сетевого управления.

Ключевые слова: псевдоградиентный алгоритм, условно нелинейная Парето-оптимальная фильтрация, нечеткий логический вывод Такаги-Сугено, нечеткая база правил, нечеткая база знаний.

doi: 10.35752/1991-2927-2021-2-64-95-104

ADAPTIVE METHOD AND ALGORITHM FOR RAPID ESTIMATION OF TRAFFIC PARAMETERS IN HIGH-SPEED CORPORATE MULTISERVICE COMMUNICATION NETWORKS

Sergei Aleksandrovich Ageev, Doctor of Sciences in Engineering, Associate Professor; graduated from the Radioengineering Faculty of Ulyanovsk Polytechnic Institute; Head of an research department of the Radioavionica, JSC in St. Petersburg; specialized in the design of telecommunication systems, automated communication management systems and the development of methods and algorithms for managing complex systems; a patent holder and author of articles in the field of designing telecommunication and multi-service systems and communication networks. e-mail: serg123_61@mail.ru.

Nina Sergeevna Ageeva, graduated from the Faculty of Engineering and Physics of the St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics, and Optics ("ITMO University"); Research Associate of the Marshal Budjonny Military Academy of Signal Corps; specialized in the field of building the automated quality-of-service management systems in multi-service communication networks; an author of articles and patents in the field of data compression methods and algorithms in multiservice communication networks. e-mail: nine11ia@yandex.ru.

Vladimir Vladimirovich Karetnikov, Doctor of Sciences in Engineering, Professor; graduated from the St. Petersburg State University of Water Communications; Head of the Department of Inland Waterway Navigation at the St. Petersburg Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping; specialized in the design and development of systems, communication networks and radio navigation systems; a patent holder and author of articles in this subject area. e-mail: spguwc-karetnicov@yandex.ru.

Andrei Andreevich Privalov, Doctor of Military Science, Professor; graduated from the Marshal Budjonny Military Academy of Signal Corps; Professor of the Department of Electrical Communication of the Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University; specialized in mathematical modeling and the development of methods, algorithms and control systems of infocommunication systems; patent holder and author of articles in the field of operational management of communication networks and large cyberphysical systems. e-mail: aprivalov@inbox.ru.

Abstract

The article deals with an adaptive method developed and an algorithm that implements it for the rapid evaluation of traffic characteristics and parameters in high-speed corporate multiservice communication networks. This algorithm operates in real-time environment.

High-speed corporate multiservice networks are characterized by high dynamics of changing their state, including changes in the characteristics of transmitted traffic. Under these conditions, the automated network management system should provide the required quality of communication services and services provided to users. Thus, the relevance of this study is determined by the need to implement network management processes in a mode close to real time, with a given quality in the conditions of dynamic priority of unknown changes in network characteristics.

The basis of the proposed method is the concept of conditional non-linear Pareto - optimal filtering by V.S. Pugachev, which consists in the fact that traffic parameters are estimated in two stages. Firstly, the forecast of parameter values is estimated, and then their correction is made with the following observations of parameters. Traffic parameter forecasts are made in a small sliding window, and refinement of current traffic parameter estimates is implemented by pseudogradient procedures, the parameters of which are regulated by the method of fuzzy Takagi-Sugeno logical output. In this case, increments in pseudo-gradient procedures are calculated relative to the average value of previous estimates calculated in a small moving window as well. This method reduced the average relative error of estimating the intensity parameters of non-stationary network traffic by 1.4-1.9 times, and also reduced the size of the sliding window in which it is processed from 1.7 to 4.2 times.

The proposed method and algorithm belong to the class of methods and algorithms which require a preliminary training. The average relative error in estimating traffic parameters does not exceed 7%, which is a sufficient value for the implementation of operational network management tasks.

Keywords: pseudogradient algorithm, conditionally nonlinear Pareto-optimal filtering, fuzzy logical Takagi-Sugeno conclusion, fuzzy rule base, fuzzy knowledge base.

ВВЕДЕНИЕ

Успехи в развитии технологий телекоммуникаций и связи привели к созданию концепции корпоративных мультисервисных сетей связи (КМСС), ядром которых являются пакетные IP-сети, интегрирующие и предоставляющие пользователям различные услуги и сервисы. КМСС разрабатываются и создаются на основе концепции сетей нового поколения (NGN) [1].

В высокоскоростных КМСС присутствуют различные сетевые процессы, имеющие разные масштабы времени. Многие из этих процессов являются весьма скоротечными и обладают значительной динамикой изменения своих характеристик и параметров. К подобным процессам можно отнести, например, процесс обеспечения передачи и управления трафиком реального времени, процесс изменения характеристик интенсивности трафика, процесс возможного изменения текущего технического состояния сетевых элементов, процесс оценки и управления текущим состоянием сетевой и информационной безопасности и так далее. Предоставление широкой номенклатуры услуг и сервисов КМСС пользователям делает актуальной проблему надежного и устойчивого управления сетью в едином технологическом цикле, в режиме времени, близком к реальному [2]. При этом заданные требования к качеству услуг и сервисов должны выполняться полностью [3]. В настоящее время существуют объективные трудности в построении системы управления КМСС, реализующей процессы сетевого управления в режиме времени, близком к реальному. Эти трудности вызваны сложностью системотехнической структуры КМСС, большим пространственным размахом сетевой инфраструктуры, необходимостью быстрого и качественного анализа значительного количества различных динамично изменяющихся сетевых характеристик и параметров. Эти параметры, в свою очередь, в большинстве случаев, представляют собой нестационарные и нелинейные случайные процессы, адекватное описание которых возможно только с помощью нелинейных стохастических математических моделей [3, 4]. Таким образом, указанные особенности высокоскоростных КМСС делают актуальной научно-техническую проблему оперативного и непрерывного оценивания поведения сетевого трафика с априори неизвестными, динамично изменяющимися характеристиками.

1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ ТРАФИКА В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ КМСС

В [5] показано, что стохастические характеристики передаваемого в КМСС трафика могут быть аппрок-

симированы с помощью следующих основных вероятностных распределений: распределение Пуассона, Парето, Вейбулла, логарифмически нормальное и экспоненциальное распределения.

Трафик в КМСС является нестационарным по своей природе, а математические модели, адекватно описывающие его поведение, являются нелинейными стохастическими моделями [6], что существенно осложняет разработку и реализацию процедур оценки его параметров и характеристик с требуемым качеством. Известно, что основными характеристиками трафика в КМСС являются максимальное и минимальное значения его интенсивности, текущее значение математического ожидания, среднее квадратичное отклонение (СКО) и коэффициент вариации его интенсивности [3, 5].

Существуют различные методы и алгоритмы оценки параметров нелинейных и нестационарных случайных процессов и последовательностей [6]. Наиболее известными из них являются методы субоптимальной нелинейной фильтрации, методы линеаризованной и расширенной Калмановской фильтрации [7, 8]. К особенностям этих методов можно отнести то обстоятельство, что результирующие их точностные характеристики существенно зависят от величин возможных возмущений, а также от характеристик нелинейностей оцениваемых параметров [8]. Применение же этих методов и алгоритмов для оценки характеристик и параметров трафика в высокоскоростных КМСС связано со значительными вычислительными затратами, необходимостью оценки параметров алгоритмов с помощью предварительного математического моделирования, что вызывает большие трудности при их технической реализации.

В [7, 8] показано, что одним из конструктивных подходов к решению задачи оценки векторных параметров случайных процессов, при нелинейных моделях наблюдений, является метод условной нелинейной Парето-оптимальной фильтрации. Суть данного метода заключается в том, что оценка неизвестного параметра производится в два этапа. На первом этапе вычисляется функция текущего прогноза оценок значений параметра. На втором этапе с помощью корректирующих функций и полученной дополнительной апостериорной информации о значениях этих оценок производят их коррекцию. Выбор класса и вида функций оценки текущего прогноза, класса и вида корректирующих функций является достаточно свободным и определяется конкретной постановкой решаемой проблемы.

В работе, на основе этого подхода, разработаны метод и алгоритм оценивания характеристик и параметров трафика, с использованием совместных оценок текущего значения математического ожидания, среднего

квадратичного отклонения (СКО) и коэффициента вариации интенсивности трафика КМСС. Предлагается адаптацию корректирующих функций к неизвестным характеристикам интенсивности трафика КМСС производить с помощью псевдоградиентных процедур, общая теория которых была заложена в работах Я.З. Цыпкина и Б.Т. Поляка [9, 10]. При этом регулирование параметров корректирующих функций в зависимости от параметров случайной последовательности (СП) и от динамики их изменений производится с помощью нечеткого логического вывода Такаги-Сугено [11].

2 Задачи исследования, метод и алгоритм оценки характеристик трафика в высокоскоростных КМСС

Пусть наблюдения интенсивности трафика КМСС на интерфейсе сетевого элемента (СЭ), например, маршрутизатора, представлены в виде СП $x(i)$, заданной в

дискретные моменты времени $i = \{1, 2, \dots, n, \dots\}$. Пусть наблюдения СП $x(i)$ описываются аддитивно-мультипликативной моделью в виде:

$$x(i) = \beta(i) \cdot F(x(i-1)) + \xi(i), \quad (1)$$

где $F(*)$ – некоторая случайная функция от наблюдений, $\beta(i)$ – некоторая случайная величина, а $\xi(i)$ – помеха наблюдений с нулевым математическим ожиданием и конечной дисперсией. Допустим также, что СП $x(i)$ имеет конечные математическое ожидание и дисперсию. Отметим, что модель (1) и сделанные допущения определяют негауссовскую, нестационарную марковскую последовательность [8].

Требуется построить векторную рекуррентную процедуру оценки значений математического ожидания СП $x(i)$, СКО СП и его коэффициента вариации по критерию минимума среднего квадрата ошибки, то есть:

$$J(i) = M\{\bar{\varepsilon}\} = \left\{ \begin{array}{l} M\left(m(i) - \hat{m}(i)\right)^2 \rightarrow \min, M\left(\sigma(i) - \hat{\sigma}(i)\right)^2 \rightarrow \min, \\ M\left(Kv(i) - \hat{Kv}(i)\right)^2 \rightarrow \min \end{array} \right\}, \quad (2)$$

где $\hat{m}(i)$, $\hat{\sigma}(i)$, $\hat{Kv}(i)$ – оценки математического ожидания, СКО и коэффициента вариации СП $x(i)$ на шаге i , а $m(i)$, $\sigma(i)$, $Kv(i)$ – их истинные значения.

Функция прогноза для текущего значения математического ожидания СП определяется как:

$$\hat{m}(i) = \frac{1}{N_1} \sum_{k=1}^{N_1} x(i-k), \quad i = 1, 2, \dots, n, \dots, \quad (3)$$

где N_1 – размер скользящего окна, который выбирается относительно небольшого размера [6].

Прогнозы оценок СКО и коэффициента вариации СП на шаге i также производятся в этом же скользящем окне:

$$\hat{\sigma}(i) = \sqrt{\frac{1}{N_1} \sum_{k=1}^{N_1} x^2(i-k) - \left(\frac{1}{N_1} \sum_{k=1}^{N_1} x(i-k) \right)^2},$$

$$i = 1, 2, \dots, n, \dots, \quad \hat{Kv} = \frac{\hat{\sigma}(i)}{\hat{m}(i)}. \quad (4)$$

Без потери общности, дальнейшее подробное рассмотрение построения корректирующей процедуры проведем для компоненты значения оценки математического ожидания функционала (2) $J_m(\hat{m}(i))$, с обобщением на векторный случай.

Как правило, значение функционала $J_m(\hat{m}(i))$ недоступно наблюдению, а доступна наблюдению только случайная реализация его градиента со случайной ошибкой, то есть:

$$\nabla Q(\xi, \hat{m}(i)) = \nabla J_m(\hat{m}(i)) + \xi(i), \quad \xi \in R, \quad (5)$$

где ξ – ошибка наблюдения градиента. Можно допустить, что ξ – центрированные, некоррелированные ошибки оценки градиента функционала качества. Минимизацию функционала (5) проведем с помощью рекуррентного алгоритма вида [6, 9, 10]:

$$\hat{m}(i+1) = \hat{m}(i) - \lambda_m(i+1) \nabla Q(\xi, \hat{m}(i+1)), \quad (6)$$

где $\nabla Q(\xi, \hat{m}(i+1))$ – некоторое случайное направление движения в фазовом пространстве в точке $\hat{m}(i+1)$; $\hat{m}(i)$ – скорректированная оценка математического ожидания на предыдущем шаге; $\{\lambda_m\}$ – последовательность положительных чисел, которая для стационарной СП, должна удовлетворять условиям [9, 10]:

$$\sum_{i=1}^{\infty} \lambda_m(i) = \infty, \quad \sum_{i=1}^{\infty} \lambda_m^2(i) < \infty, \quad (7)$$

где $\{\lambda_m(i)\}$ – коэффициенты шага алгоритма. Как известно, вектор $\nabla Q(\xi, \hat{m}(i))$ называется псевдогради-

ентом в точке $\hat{m}(i)$, если в этой точке выполняется условие [9, 10]:

$$\nabla J_m(\hat{m}(i-1)) \cdot M \left\{ \nabla Q(\xi, \hat{m}(i)) \right\} \geq 0, \quad (8)$$

где $M \{*\}$ – операция математического ожидания. Реализацию функционала качества в точке $\hat{m}(i+1)$ можно представить следующим образом [9, 10]:

$$Q(\hat{m}(i+1)) = \left(\hat{m}(i+1) - \hat{m}(i) \right)^2. \quad (9)$$

Тогда, после несложных преобразований, рекуррентный псевдоградиентный алгоритм (ПГА) оценивания текущего значения математического ожидания СП, с учётом знаков, будет иметь вид:

$$\hat{m}(i+1) = \hat{m}(i) + \lambda_m(i+1) \left(\hat{m}(i+1) - \hat{m}(i) \right). \quad (10)$$

С целью уменьшения средней относительной ошибки оценки математического ожидания интенсивности трафика в КМСС, предлагается корректирующую процедуру (12) строить на основе среднего значения предыдущих оценок, в виде:

$$\tilde{m}(i) = \frac{1}{N_2} \sum_{k=0}^{N_2-1} \hat{m}(i-k), \quad (11)$$

где N_2 – размер второго скользящего окна, в котором проводится усреднение оценок математического ожидания интенсивности трафика, а $\tilde{m}(i)$ – среднее значение оценок в этом скользящем окне. Тогда выражение (10) примет вид:

$$\begin{aligned} \hat{m}(i+1) = \hat{m}(i) + \lambda_m(i+1) \times \\ \times \left(\hat{m}(i+1) - \frac{1}{N_2} \sum_{k=0}^{N_2-1} \hat{m}(i-k) \right). \end{aligned} \quad (12)$$

В сокращенном виде (12) можно записать как:

$$\hat{m}(i+1) = \hat{m}(i) + \lambda_m(i+1) \left(\hat{m}(i+1) - \tilde{m}(i) \right). \quad (13)$$

Аналогичный подход применяется для всех компонент вектора $\nabla Q(\xi, \hat{e}(i))$. Обобщением рекуррентной процедуры (13) является векторный ПГА вида:

$$\hat{G}(i+1) = \hat{G}(i) + R(i+1) \times \nabla Q(i+1), \quad (14)$$

где $\hat{G}(i+1)$ – вектор оценок параметров СП на шаге $i+1$:

$$\hat{G}(i+1) = \left[\hat{m}(i+1), \hat{\sigma}(i+1), \hat{K}v(i+1) \right]^T. \quad (15)$$

Матрица $R(i+1)$ является диагональной матрицей коэффициентов шага.

Отметим, что алгоритмы (10), (13) и (14) являются ПГА. Это утверждение основано на корректной проверке выполнения условия (8). Откуда следует вывод о том, что данные процедуры обладают всеми свойствами ПГА

[9, 10]. Также отметим еще одно важное свойство предложенного алгоритма: его структура не зависит от статистических характеристик СП $x(i)$. Данное свойство ПГА является следствием центральной предельной теоремы [12]. Таким образом, для любых вероятностных характеристик интенсивности сетевого трафика, структура алгоритма оценки постоянна, а изменяться могут только его параметры.

Для оценивания параметров нестационарных СП условие (7) ограничивает применение ПГА, так как ПГА должен отслеживать изменения значения параметров трафика, а не сходиться к определённым их значениям. Поэтому последовательность $R(i+1)$ ограничивается снизу постоянными значениями. Как следствие выбора ограниченного коэффициента шага, дисперсия оценки параметров СП также будет ограничена снизу. Следовательно, необходимо найти компромиссное решение между скоростью и точностью оценивания значений интенсивности СП [6].

В разработанных методе и алгоритме предлагается при выборе вектора коэффициентов шага учитывать динамику изменения оцениваемых параметров и характеристик СП. Очевидно, что модули градиентов компонент векторного функционала качества пропорциональны динамическим свойствам СП. Подобные зависимости носят характер трудноформализуемых задач, поэтому предлагается процедуру подстройки коэффициентов шага ПГА автоматизировать на основе метода нечёткого вывода Такаги-Сугено или на основе его частного вида – синглтонного метода [11], имеющего вид:

$$\begin{aligned} \text{ЕСЛИ } < \hat{m}(i) \in D1 > \text{ И } < \nabla Q(i) \in D2 > \\ & \text{ И } < \hat{\sigma}^2(i) \in D3 > \\ \text{ТО } R(i+1) = R(k) \text{ И } N_1 = N_1(k) \\ & \text{ И } N_2 = N_2(k), \end{aligned} \quad (16)$$

где $D1$, $D2$ и $D3$ – области текущих значений оценки математического ожидания СП, оценки значений компонент градиента в корректирующей процедуре (14) и оценки дисперсии СП; N_1 и N_2 – размеры соответствующих скользящих окон в выражениях (3), (4) и (11).

Для реализации этих правил предварительно проводится обучение системы нечёткого логического вывода по экспериментальным данным, полученным на стадии ее проектирования, на тестовых СП, с известными статистическими параметрами [10]. Увеличение размера скользящего окна, если возникает такая необходимость, производится последовательно, с шагом, равным одной ячейке скользящего окна. Это позволяет обеспечить наблюдаемость оцениваемых параметров СП.

Особенностью данной системы нечеткого логического вывода является то, что обучение производится на этапе ее проектирования. На этапе эксплуатации возможна небольшая корректировка нечетких баз правил и нечетких баз знаний.

3 Анализ результатов математического моделирования

Математическое моделирование проверки эффективности алгоритма оценки характеристик интенсивности трафика КМСС проводилось для трафиков, имеющих логарифмически нормальное распределение.

Модулирующие функции для моделирования нестационарных СП представляли собой СП авторегрессии первого порядка (АР-1) [6, 8], а также детерминированные функции.

На рисунке 1 приведен полученный на этапе предварительного обучения системы нечеткого логического вывода график поверхности коэффициентов шага для процедуры корректировки оценок математического ожидания СП в зависимости от периода его изменения и от возможного значения модуля оценки его градиента. При этом значение λ_m выбиралось таким образом,

Рис. 1. Зависимость коэффициента шага ПГА от периода T изменения математического ожидания и от значения $|\nabla Q_m|$ при котором достигается минимальное значение средне относительной ошибки оценивания текущего значения математического ожидания СП δ %

а) трехмерная поверхность $\delta = f_1(N_1, N_2)$ %

чтобы средняя относительная погрешность оценки δ и ее СКО σ_δ были минимально возможными.

Далее, после обучения алгоритма выбора значений $\{\lambda_m\}$, определялись рациональные значения размеров скользящих окон N_1 и N_2 и, при которых достигались минимальные значения средней относительной ошибки оценки математического ожидания СП δ % и СКО средней относительной ошибки оценки математического ожидания σ_δ %. Эти зависимости приведены на рисунках 2 и 3.

Среднее значение процесса составило приблизительно 312 Мбит/с, максимальное значение процесса – 831 Мбит/с, минимальное значение процесса – 110 Мбит/с.

Время изменения значения математического ожидания СП от минимального до максимального значения составляло около 300 миллисекунд. Математическое ожидание СП моделировалось процессом АР-1.

Анализ полученных зависимостей показал, что рациональные значения N_1 и N_2 и составили $N_1 \in [30 - 50]$ и $N_2 \in [25 - 45]$ отсчетов. При этом значение δ не превышало 3%, а значение σ_δ не превышало 0,2%. Дальнейшее увеличения размеров скользящих окон приводило к увеличению этих значений, так как происходило излишнее сглаживание параметров СП.

На рисунке 4 приведены результаты проверки с помощью критерия χ^2 гипотезы о нормализации СП после применения процедуры (3) при конечных значениях размера скользящего окна N_1 для логарифмически нормального распределения СП [12]. На рисунке 4 а приведен график значений отсчетов СП, а на рисунке 4 б приведена гистограмма распределений ее значений. Рисунок 4 в иллюстрирует нормированную гистограмму распределения значений модулей абсолютных ошибок оценки $m(i)$. На графиках рисунка 4 г представлены нормированные гистограммы СП, полученной после

б) области равных уровней $\delta = \psi(N_1, N_2)$ %.

Область «AREA А», в которой $\delta \leq 2,8$ %

Рис. 2. Зависимость средней относительной погрешности оценки математического ожидания от N_1 и N_2

а) трехмерная поверхность $\sigma_{\delta} = f_2(N_1, N_2)\%$

б) области равных уровней $\sigma_{\delta} = \psi_2(N_1, N_2)\%$.
Область «AREA A», в которой $\delta \leq 0,2\%$

Рис. 3. Зависимость значения СКО средней относительной погрешности оценки математического ожидания от N_1 и N_2

а) Значения СП

б) Гистограмма значения СП

в) Нормированная гистограмма значений модулей абсолютных ошибок оценивания $m(i)$

г) Теоретические распределения и нормированные гистограммы СП, после применения процедуры (3)

Рис. 4. Результаты проверки гипотезы о нормализации СП после процедуры (3) по критерию χ^2

применения процедуры (3). На этом рисунке цифрой 1 отмечены графики теоретической нормальной плотности распределения значений $\hat{m}(i)$, параметрами которых являются оценки математического ожидания и дисперсии СП, полученной после применения процедуры (3), а цифрой 2 обозначены нормированные гистограммы этих распределений для СП с различными значениями параметров.

Значение уровня значимости критерия χ^2 гипотезы о нормализации СП составило менее $\alpha = 0,01$. Аналогичные результаты были получены для СП с распределением Пуассона, а также с экспоненциальным распределением.

Пример оценки текущего значения математического ожидания СП с логарифмически нормальным законом распределения своих значений приведен на рисунке 5. Модулирующей функцией в этом примере являлся процесс АР-1.

В этом численном эксперименте модулирующей функцией был процесс АР-1. При этом были получены значения средней относительной погрешности оценки $m(i)$ $\delta = 3,6\%$ и СКО этой погрешности $\sigma_\delta = 0,41\%$. Как видно из приведенных графических результатов, СП обладает высокой динамикой изменения своих основных параметров. Отсчеты СП генерировались через одну микросекунду (10^{-6} с). Значения N_1 и N_2 составили $N_1 = 35$ и $N_2 = 35$ отсчетов.

На рисунке 6 приведен пример оценки текущего значения математического ожидания СП с логарифмически

нормальным законом распределения своих значений. Математическое ожидание СП представлено в виде периодической детерминированной функции времени.

В данном численном эксперименте значения N_1 и N_2 также были равными между собой и составили отсчетов. Значение δ составило 3,24%, а значение $\sigma_\delta = 0,21\%$.

Проведенное исследование показало, что для стационарных СП с логарифмически нормальным распределением при изменении его математического ожидания в диапазоне от 23 до 755 и одновременно дисперсии процесса от 12,15 до 400, значение δ изменяется от 0,043% до 1,12%, а значение σ_δ – от 0,043% до 0,096%.

Выводы

Анализ результатов математического моделирования алгоритма оперативного оценивания характеристик трафика в высокоскоростных КМСС показал его возможность функционировать в режиме жесткого реального времени. Подобный алгоритм достаточно просто реализуется в составе распределенных интеллектуальных агентов для обеспечения оперативного сетевого управления.

Разработанные метод и алгоритм позволяют получать высокие точностные характеристики оценок нестационарных трафиков, передаваемых в КМСС. Так, например, средняя относительная ошибка оценки параметров трафика не превышает значения 7%, а СКО значения этой оценки составляет менее 0,46%. Достиг-

а) СП с логарифмически нормальным законом распределения, где А – область изменения коэффициента корреляции модулирующего АР-процесса

б) оценка значений $\hat{m}(i)$, где 1 – модельные значения $\hat{m}(i)$; 2 – оценка значений $\hat{m}(i)$; 3 – значение модуля абсолютной погрешности оценки $\hat{m}(i)$; $\delta = 3,6\%$, $\sigma_\delta = 0,41\%$

Рис. 5. Оценка текущего значения математического ожидания СП с логарифмически нормальным законом распределения своих значений. Модулирующая функция – СП АР-1

а) СП с логарифмически нормальным законом распределения

б) Оценка значений $\hat{m}(i)$: где 1 – оценка значений $\hat{m}(i)$; 2 – модельные значения $\hat{m}(i)$; 3 – значение модуля абсолютной погрешности оценки $\hat{m}(i)$;
 $\delta = 3,24\%$, $\sigma_{\delta} = 0,21\%$

Рис. 6. Оценка текущего значения математического ожидания СП с логарифмически нормальным законом распределения. Модулирующая функция – периодическая детерминированная функция времени

нутые характеристики алгоритма достаточны для оперативного принятия обоснованных управленческих решений.

Другим важным свойством разработанного метода является независимость его структуры от вида распределения входного трафика. В работе это свойство подтверждено экспериментально для небольшого числа слагаемых в прогнозирующей функции алгоритма с помощью критерия χ^2 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ITU-T: General overview of NGN. Recommendation Y.2001. Geneva, 2004.
2. ITU-T Recommendation G.1000, Communications quality of service: A framework and definitions. Geneva, 2001.
3. Назаров А.Н., Сычев К.И. Модели и методы расчёта показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения. Красноярск : Изд-во ООО «Поликом», 2010. 389 с.
4. Гольдштейн Б.С., Соколов Н.А., Яновский Г.Г. Сети связи : учеб. для ВУЗов. СПб. : БХВ, 2011. 400 с.
5. Симонина О.А. Модели расчета показателей QoS в сетях следующего поколения : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2005. 129 с.
6. Adaptive method of detecting traffic anomalies in high-speed multi-service communication networks / S. Ageev, V. Karetnikov, E. Ol'khovik, A. Privalov // E3S Web

of Conferences. Key Trends in Transportation Innovation, KTTI 2019. 2020. P. 04027

7. Пугачев В.С. Условно оптимальная фильтрация и экстраполяция непрерывных процессов // Автоматика и телемеханика. 1984. № 2. С. 82–89.

8. Сеницын И.Н. Фильтры Калмана и Пугачева : учеб. пособие. М. : Университетская книга, Логос, 2006. 640 с.

9. Поляк Б.Т., Цыпкин Я.З. Псевдоградиентные алгоритмы адаптации и обучения // Автоматика и телемеханика. 1973. № 3. С. 45–63.

10. Поляк Б.Т., Цыпкин Я.З. Оптимальные псевдоградиентные алгоритмы адаптации // Автоматика и телемеханика. 1980. № 8. С. 74–84.

11. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control // IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics. 1985. Vol. 15, No. 1. pp. 11–132.

12. Крамер Г. Математические методы статистики : пер. с англ. / под ред. А.Н. Колмогорова. М. : Мир, 1976. 632 с.

REFERENCES

1. ITU-T: General Overview of NGN. Recommendation Y.2001. Geneva, 2004.
2. ITU-T Recommendation G.1000, Communications Quality of Service: A Framework and Definitions. Geneva, 2001.
3. Nazarov A.N., Sychev K.I. Modeli i metody rascheta pokazatelei kachestva funktsionirovaniia uzlovogo

oborudovaniia i strukturno-setevykh parametrov setei svyazi sleduiushchego pokoleniia [Models and Methods for Evaluating the Nodal Equipment Quality Performance and the Structural System Parameters of the Next-Generation Communication Networks]. Krasnoyarsk, OOO "Polikom" Publ., 2010. 389 p.

4. Goldshtein B.S., Sokolov N.A., Ianovskiy G.G. *Seti svyazi*. Ucheb. dlia VUZov [Communication Networks. Tutorial for Universities]. St. Petersburg, BHV Publ., 2011. 400 p.

5. Simonina O.A. *Modeli rascheta pokazatelei QoS v setiakh sleduiushchego pokoleniia*. Dis. kand. tekhn. nauk [Models for Evaluating the QoS Performance of Next-Generation Networks. Dr. eng. sci. diss.]. St.Petersburg, 2005. 129 p.

6. Ageev S., Karetnikov V., Olkhovik E., Privalov A. Adaptive Method of Detecting Traffic Anomalies in High-Speed Multi-Service Communication Networks. *E3S Web of Conferences. Key Trends in Transportation Innovation, KTTI 2019*. 2020, p. 04027.

7. Pugachev V.S. Uslovno optimalnaia filtratsiia i ekstrapoliatsiia nepreryvnykh protsessov [Specific Optimal Filtering and Continuous Process Extrapolation]. *Avtomatika*

i telemekhanika [Automatics and Telemechanics]. 1984, no. 2, pp. 82–89.

8. Sinitsyn I.N. *Filtry Kalmana i Pugacheva*. Ucheb. posobie [Pugachev's and Kalman Filters. Tutorial]. Moscow, Universitetskaya kniga, Logos Publ., 2006. 640 p.

9. Poliakov B.T., Tsypkin Ia.Z. Pseudogradientnye algoritmy adaptatsii i obucheniia [Pseudogradient Algorithms of Adoption and Training]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automatics and Telemechanics], 1973, no. 3, pp. 45–63.

10. Poliakov B.T., Tsypkin Ia.Z. Optimalnye pseudogradientnye algoritmy adaptatsii [Optimal Pseudogradient Training Algorithms]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automatics and Telemechanics], 1980, no. 8, pp. 74–84.

11. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control. *IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics*, 1985, vol. 15, no. 1, pp. 11–132.

12. Cramer G. *Matematicheskie metody statistiki*. Per. s angl. pod red. A.N. Kolmogorova [Mathematical Methods of Statistics. Transl. from Engl., ed. A.N. Kolmogorov]. Moscow, Mir Publ., 1976. 632 p.