

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 681.142.33:681.14

С.А. Агеев, И.Б. Саенко, Ю.П. Егоров, Е.И. Зозуля, А.А. Гладких

АДАПТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ТРАФИКА В МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ СЕТЯХ СВЯЗИ¹

Агеев Сергей Александрович, кандидат технических наук, доцент, докторант Военной академии связи, г. Санкт-Петербург. Окончил радиотехнический факультет Ульяновского политехнического института. Начальник научно-технического центра Ленинградского отделения федерального государственного унитарного предприятия Центрального научно-исследовательского института связи (ФГУП ЦНИИС-ЛО ЦНИИС). Специализируется в области проектирования телекоммуникационных систем. Имеет статьи, патенты в области систем передачи данных. [e-mail: serg123@mail.ru].

Саенко Игорь Борисович, доктор технических наук, профессор. Окончил Военную академию связи, адъюнктуру и докторантуру там же. Ведущий научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики Российской академии наук (СПИИРАН). Специализируется в области создания и разработки информационно-управляющих систем. Имеет в этой области монографии, статьи и патенты. [e-mail: ibsaen@mail.ru].

Егоров Юрий Петрович, доктор технических наук, профессор, окончил радиотехнический факультет Ленинградского высшего инженерного морского училища им. адм. С.О. Макарова. Главный научный сотрудник ФНПЦ ОАО «НПО «Марс», г. Ульяновск. Специализируется в области макропроектирования больших информационно-управляющих систем. Имеет монографии, статьи, патенты в области проектирования автоматизированных информационно-управляющих систем организационного типа. [e-mail: yure@mail.ru].

Зозуля Евгений Игоревич, аспирант Санкт-Петербургского научно-исследовательского университета – Института точной механики и оптики, окончил факультет информационных технологий и программирования СПб НИУ – ИТМО, начальник лаборатории ФГУП ЦНИИС-ЛО ЦНИИС. Специализируется в области создания и разработки больших информационно-управляющих систем организационного типа. [e-mail: eugenezozulia@gmail.com].

Гладких Анатолий Афанасьевич, кандидат технических наук, профессор кафедры «Телекоммуникации» Ульяновского государственного технического университета, окончил Военную академию связи, адъюнктуру там же. Область научных интересов – помехоустойчивое кодирование, адаптивные методы управления. Имеет монографии, статьи, патенты в данной предметной области. [e-mail: a_gladkikh@mail.ru].

Аннотация

В статье предложены и исследованы адаптивные алгоритмы оценивания интенсивности трафика в мультисервисных сетях (МСС) передачи данных, интерпретированного как нестационарный случайный процесс экспоненциального класса. Предложенные алгоритмы функционируют в режиме, близком к реальному времени, и с качеством, сравнимым с потенциально достижимым. Алгоритмы могут использоваться для исследования и управления эксплуатацией МСС передачи данных.

¹ Работа выполняется при поддержке гранта РФФИ 11-07-00435-а.

Ключевые слова: мультисервисная сеть, телематические сетевые услуги, автоматизация управления, стохастическая аппроксимация, адаптивное управление, тренд, оценивание, случайный процесс, адаптивные алгоритмы, интенсивность трафика.

Sergey Alexanderovich Ageev, Candidate of Engineering, Associate Professor, advanced doctoral student of the Military Communications Academy (St. Petersburg); graduated from the Faculty of Radioengineering of Ulyanovsk Polytechnic Institute; head of a scientific and technical centre of Federal State Unitary Enterprise Central Communications Research Institute – Leningrad Department of Central Communications Research Institute; specializes in the field of telecommunications-system design; author of articles, patents in the field of data-transfer systems. e-mail: serg123@mail.ru.

Igor Borisovich Saenko, Doctor of Engineering, Professor, graduated from the Military Communications Academy, completed his post-graduate and advanced doctoral programs at the same academy; leading staff scientist at St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (St. Petersburg), specializes in the field of creation and development of information-management systems; author of monographs, articles and patents in this field. e-mail: ibsaen@mail.ru.

Yury Petrovich Egorov, Doctor of Engineering, Professor; graduated from the Faculty of Radioengineering of Leningrad Higher Marine School named after admiral S. Makarov; chief staff scientist at Federal Research-and-Production Center Open Joint-Stock Company 'Research-and-Production Association 'Mars' (Ulyanovsk); specializes in the field of macro-design of large-scale information-management systems; author of monographs, articles, patents in the field of design of computer-aided C2 systems for troop control. e-mail: yupe@mail.ru.

Evgeny Igorevich Zozulia, Post-graduate student of St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; graduated from St. Petersburg University ITMO, the Faculty of Information Technologies and Programming; head of Laboratory at Federal State Unitary Enterprise Central Communications Research Institute – Leningrad Department of Central Communications Research Institute; specializes in the field of creation and development of large-scale information-management systems for troop control. e-mail: eugenezozulia@gmail.com.

Anatoly Afanasyevich Gladkikh, Candidate of Engineering; Professor at the 'Telecommunications' Chair of Ulyanovsk State Technical University; graduated from the Military Communications Academy named after S. Budenny; finished his post-graduate studies at the same academy; is interested in antinoise coding, adaptive management method; author of monographs articles, patents in this subject area. e-mail: a_gladfkikh@mail.ru.

Abstract

The article presents and researches adaptive algorithms of traffic intensity estimation in multiservice networks of data transmission. The traffic is interpreted as nonsteady random process of exponential class. The proposed algorithms operate in near-real-time mode and with quality that is comparable to potentially achievable one. The algorithms can be used for research and service control of multiservice networks of data transmission.

Key words: Multiservice network, telematics network services, control automation, stochastic approximation, adaptive management, trend, estimation, random process, adaptive algorithms, traffic intensity.

ВВЕДЕНИЕ

Основным назначением автоматизированной системы управления МСС (АСУС) является обеспечение выполнения сетью основных своих показателей. К основным показателями функционирования МСС относятся:

- производительность;
- время реакции МСС на действия и запросы пользователей, а также на внешние деструктивные воздействия на сеть;
- надежность, устойчивость и живучесть МСС;
- безопасность;
- количество и качество предоставляемых МСС телематических услуг;
- управляемость.

Важнейшим показателем функционирования АСУС является оперативность управления, которая, в свою очередь, зависит от времени оценивания сетевых характеристик и времени принятия решения [1, 2].

Во время эксплуатации МСС управленческие решения направлены на обеспечение ее требуемых технических характеристик по удовлетворению потребностей сетевых абонентов в количестве и качестве предоставляемых МСС телематических услуг. Одним из основных параметров МСС, на основе которого принимаются решения по управлению качеством телематических услуг, об управлении процедурами маршрутизации, а также об управлении обеспечением заданных вероятностно-временных характеристик (ВВХ), является знание текущих значений интенсивностей трафика в каналах связи МСС [3].

Например, задачи оптимизации выбора маршрутов передачи данных и управления потоками, основанные на потоковых моделях и аппроксимации трафика вида $M/M/1$, формулируются следующим образом [4–6].

Дано:

- топологическая структура МСС;
- матрица входных потоков $|\gamma_{jk}|$;
- пропускные способности каналов связи $|C_j|$;
- средняя длина пакетов $1/\mu$.

Требуется минимизировать время доставки пакетов по составному логическому каналу:

$$T = \sum_{i=1}^E \frac{\lambda_i}{\gamma} \left[\frac{1}{\mu_i C_i - \lambda_i} \right] \rightarrow \min \{\lambda_i\}, \quad (1)$$

где T – время доставки пакета,

E – количество каналов логического пути в МСС,

λ_i – интенсивность трафика в i -м канале МСС,

μ_i – среднее время обслуживания пакета в i -м канале связи МСС,

γ – суммарная интенсивность внешнего для МСС трафика,

C_i – пропускная способность i -го канала связи МСС.

При этом должны быть выполнены ограничения:

$$\frac{\lambda_i}{\mu_i} < C_i, \quad (2)$$

$$0 \leq d_i^{jk} \leq 1, \quad \sum_{i=1}^N d_i^{jk} = 1, \quad j, k = \overline{1, N}, \quad (3)$$

где N – число узлов коммутации МСС, а интенсивность λ_i определяется как:

$$\lambda_i = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^M d_i^{jk} r_{l,i}^{jk} \gamma_{j,k}. \quad (4)$$

Для этого выражения d_i^{jk} – элемент матрицы селекторов пути, который определяет долю потока узла j , предназначенного для узла k , который направлен по пути l ;

$r_{l,i}^{jk}$ – элементы матрицы связности МСС;

$\gamma_{j,k}$ – интенсивность трафика между узлами j и k [7].

На этапе проектирования МСС значения λ_i выбирают по минимальным и максимальным границам, а на этапе эксплуатации вместо точного значения интенсивности используют значение ее оценки. Таким образом, разработка и исследование адаптивных процедур оценивания интенсивности нестационарного трафика является важной научно-технической задачей.

Данная работа посвящена разработке и исследованию адаптивных алгоритмов оценивания интенсивности сетевого трафика МСС.

Постановка задачи исследования

Во многих работах, посвященных моделированию функционирования пакетных сетей [1–3, 8, 9], закон распределения вероятностей значений интенсивности сетевого трафика принимается пуассоновским, плотность функции распределения (ПФР) которого имеет вид:

$$f(t) = \lambda(t) e^{-\lambda t}, \quad (5)$$

где t – время, а $\lambda(t)$ – интенсивность трафика. В свою очередь, постоянные значения λ возможны только в стационарном случае, что является частным случаем функционирования МСС. Следовательно, $\lambda = \varphi(t)$ – интенсивность сетевого трафика также является случайной функцией времени, то есть случайным процессом (СП). Отметим, что СП $\lambda(t)$ является трендом сетевого трафика.

Таким образом, представляют практический интерес алгоритмы оценивания $\lambda(t)$, функционирующие в режиме, близком к режиму реального времени, требующие для своей реализации минимальных вычислительных ресурсов, и с качеством, достаточным для принятия объективных и обоснованных управленческих решений.

Подобные алгоритмы должны иметь минимальное количество настраиваемых параметров. Характеристики их функционирования не должны зависеть от класса обрабатываемого СП.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО РАЗРАБОТКЕ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНИВАНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ТРАФИКА В МСС

В настоящей работе предлагаются адаптивные алгоритмы оценивания интенсивности нестационарного СП экспоненциального класса. Первый алгоритм является модифицированным алгоритмом стохастической аппроксимации (СА) [10, 11]. Второй алгоритм – это алгоритм оценивания в «скользящем окне» (СО) [12].

Пусть СП задан в дискретные моменты времени $t = \{1, 2, \dots, n, \dots\}$, что соответствует реальной ситуации его обработки на вычислительных средствах. Рассмотрим построение вышеуказанных процедур.

1. Модифицированный алгоритм СА

Алгоритм классической СА имеет вид [10]:

$$\hat{\lambda}_n = \hat{\lambda}_{n-1} - a_n \nabla J(W), \quad (6)$$

где $\nabla J(W)$ – градиент наблюдаемого функционала качества процедуры оценивания в n -й момент времени,

$\hat{\lambda}_n$ – оценка интенсивности СП в текущий момент времени n ,

$\hat{\lambda}_{n-1}$ – оценка интенсивности СП в предыдущий момент времени,

$\{a_n\}$ – последовательность положительных чисел, удовлетворяющих условиям:

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

Эти значения называют коэффициентами шага алгоритма. Такой последовательностью может быть последовательность вида $a_n = 1/n$, где n – номер наблюдаемого отсчета СП. Необходимость и смысл выполнения условий (7) показаны в работе [10].

Функционал качества W целесообразно выбрать как квадратичный функционал вида:

$$W = M \left\{ (\lambda_n - \hat{\lambda}_n)^2 \right\}, \quad (8)$$

где $M\{\ast\}$ – символ математического ожидания,

λ_n – истинное значение интенсивности трафика на n -м шаге (в общем случае – ненаблюдаемая величина),

$\hat{\lambda}_n$ – значение оценки тренда трафика на n -м шаге.

Наблюдение (Y_n) для n -го шага представляется как сумма истинного значения оцениваемой интенсивности и некоторой ошибки наблюдения, то есть:

$$Y_n = \lambda_n + \varepsilon_n. \quad (9)$$

В итоге градиент наблюдаемого функционала качества определяется выражением:

$$\nabla J(W) = \frac{\partial}{\partial \hat{\lambda}_n} (Y_n - \hat{\lambda}_{n-1})^2 = -2(Y_n - \hat{\lambda}_{n-1}). \quad (10)$$

Численный коэффициент можно учесть при выборе начального значения a_0 . Тогда вид рекуррентной процедуры оценивания, с учетом знаков, будет иметь вид:

$$\hat{\lambda}_n = \hat{\lambda}_{n-1} + a_n (Y_n - \hat{\lambda}_{n-1}). \quad (11)$$

Классический алгоритм СА хорошо себя зарекомендовал для оценивания параметров стационарных СП, но для оценивания нестационарных интенсивностей условие (3) ограничивает его применение. Дело в том, что алгоритм СА должен отслеживать изменения значения интенсивности, а не сходиться к определенному ее значению. Поэтому предлагается последовательность $\{a_n\}$ ограничить снизу постоянным значением. Как следствие, дисперсия оценки интенсивности СП также будет ограничена снизу. Следовательно, необходимо найти компромиссное решение между скоростью и точностью оценивания значений интенсивности СП. Учитывая сформулированные ограничения, модифицированный алгоритм СА (МСА) будет иметь вид [13, 14]:

$$\hat{\lambda}_n = \hat{\lambda}_{n-1} + a (Y_n - \hat{\lambda}_{n-1}). \quad (12)$$

Параметр a должен удовлетворять следующим условиям:

$$0 < a < 1, a = const. \quad (13)$$

Следует отметить, что алгоритмы СА и МСА относятся к классу безидентификационных алгоритмов.

2. Алгоритм оценивания значений нестационарной интенсивности СП в «скользящем окне»

Учитывая, что $\lambda(t)$ является математическим ожиданием для СП с экспоненциальной плотностью распределения, данный алгоритм имеет вид:

$$\hat{\lambda}_n = \frac{1}{N} \sum_{n=i}^{i+N} Y_n, \quad (14)$$

где $\hat{\lambda}_n$ – оценка интенсивности СП в текущий момент времени,

Y_n – текущее наблюдение значений СП в СО,

N – размер СО,

i – номер текущего наблюдения, с которого начинается окно $i = 0, n$.

Подобные процедуры широко применяются для оценивания изменяющихся параметров [8, 12].

Особенностями реализации данного алгоритма являются следующие обстоятельства. При выборе размера СО необходимо найти компромисс между скоростью изменения значений СП, чтобы не было эффекта излишнего сглаживания значений интенсивности СП при большом размере СО, а также между размером окна и репрезентативностью выборки значений СП в СО и его размером.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В работе тренд СП вида (1) моделировался следующими функциями:

1. «Ступенька», имеющая вид:

$$\lambda(n) = u_1 + u(n - n_0),$$

где u_1 – постоянная составляющая интенсивности СП,

$u(n - n_0)$ – функция «ступенька».

2. Периодическая детерминированная интенсивность СП, зависимость от времени которой имеет вид:

$$\lambda(n) = \lambda_0 + c_0 \sin(2\pi n / T), \quad (15)$$

где λ_0 – постоянная составляющая интенсивности СП,

c_0 – нормирующий множитель,

T – период изменения интенсивности СП.

3. Стохастическая интенсивность СП, моделируемая процессом авторегрессии первого порядка (АРР), имеющая вид [11]:

$$\begin{aligned} \lambda(n) &= \rho \lambda(n-1) + \sigma_\lambda \sqrt{1 - \rho^2} \xi_n, \\ \lambda_T(n) &= \lambda_0 + \lambda(n), \end{aligned} \quad (16)$$

где λ_0 – постоянная составляющая интенсивности СП,

$\lambda(n)$ – переменная составляющая интенсивности СП,

ρ – коэффициент корреляции процесса АРР,

σ_λ – значение дисперсии процесса АРР, которое во всех численных экспериментах выбиралось равным единице,

ξ_n – случайная величина (СВ), имеющая нормальный закон распределения. СВ, распределенные по пуассоновскому закону, моделировались стандартным способом [11].

На рисунке 1 приведены результаты моделирования алгоритма МСА по оцениванию интенсивности СП, заданной с помощью функции $\lambda(n) = u_1 + u(n - n_0)$, а на рисунке 2 – результаты моделирования алгоритма СО.

Анализ результатов моделирования показывает, что скорость сходимости у алгоритмов приблизительно одинакова. Характеристики точности также близки по своим значениям. Особенностью алгоритма МСА является то, что ему требуется приблизительно от 270 до 500 отсчетов на начальном этапе своей работы, чтобы войти в следящий режим.

На рисунке 3 представлены результаты моделирования процедур оценивания периодической интенсивности СП для процедуры МСА, а на рисунке 4 – для процедуры СО.

Параметры полученных результатов позволяют сделать вывод о том, что алгоритмы МСА и СО имеют приблизительно одинаковые характеристики.

Этот вывод можно также сделать и из анализа данных по оцениванию периодической интенсивности СП, представленных на рисунках 5 (алгоритм МСА) и 6 (алгоритм СО).

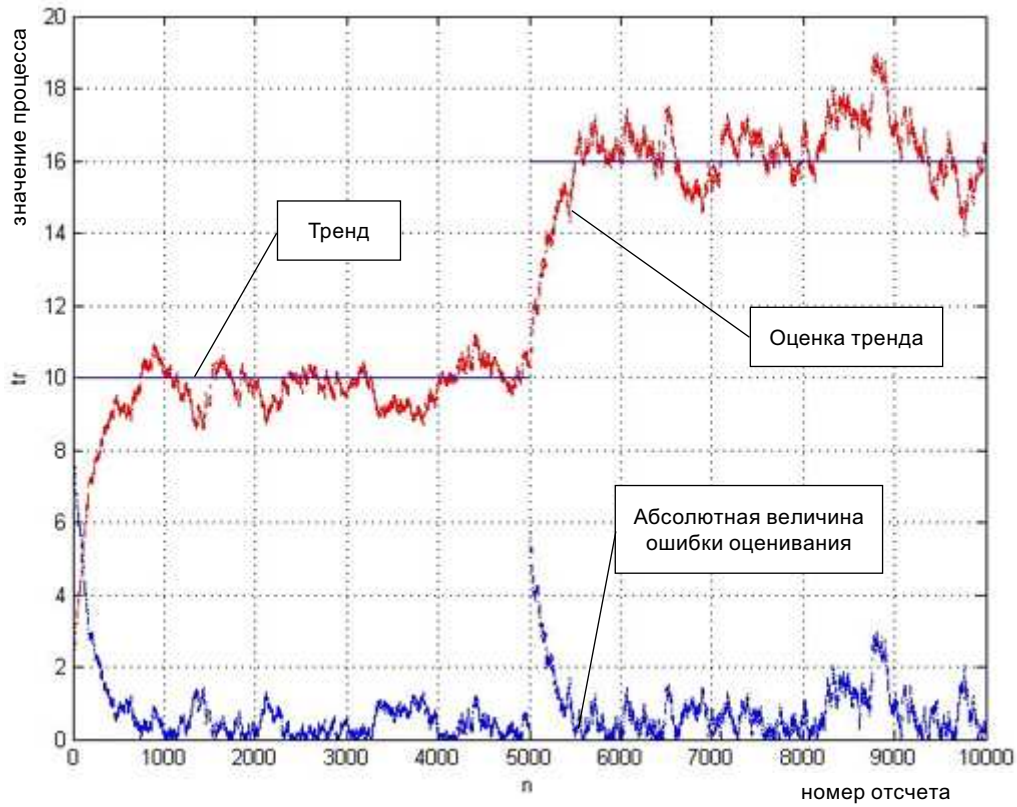


Рис. 1. Оценка ступенчатой интенсивности СП алгоритмом МСА

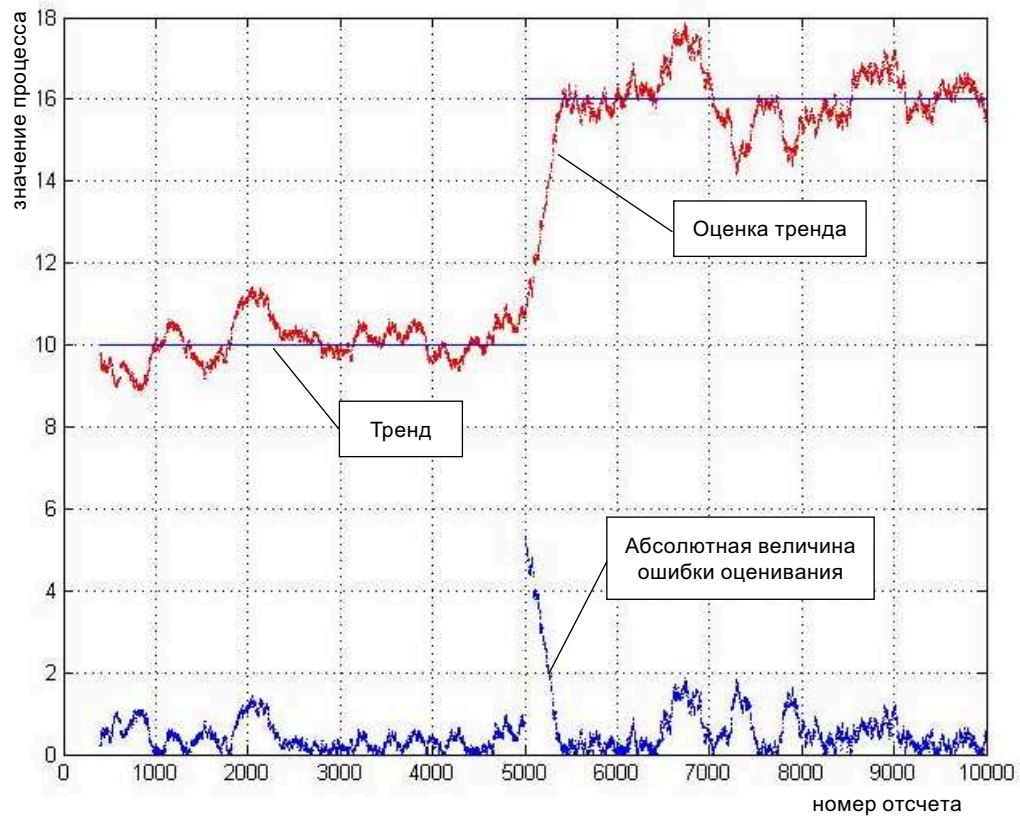


Рис. 2. Оценка ступенчатой интенсивности СП алгоритмом СО

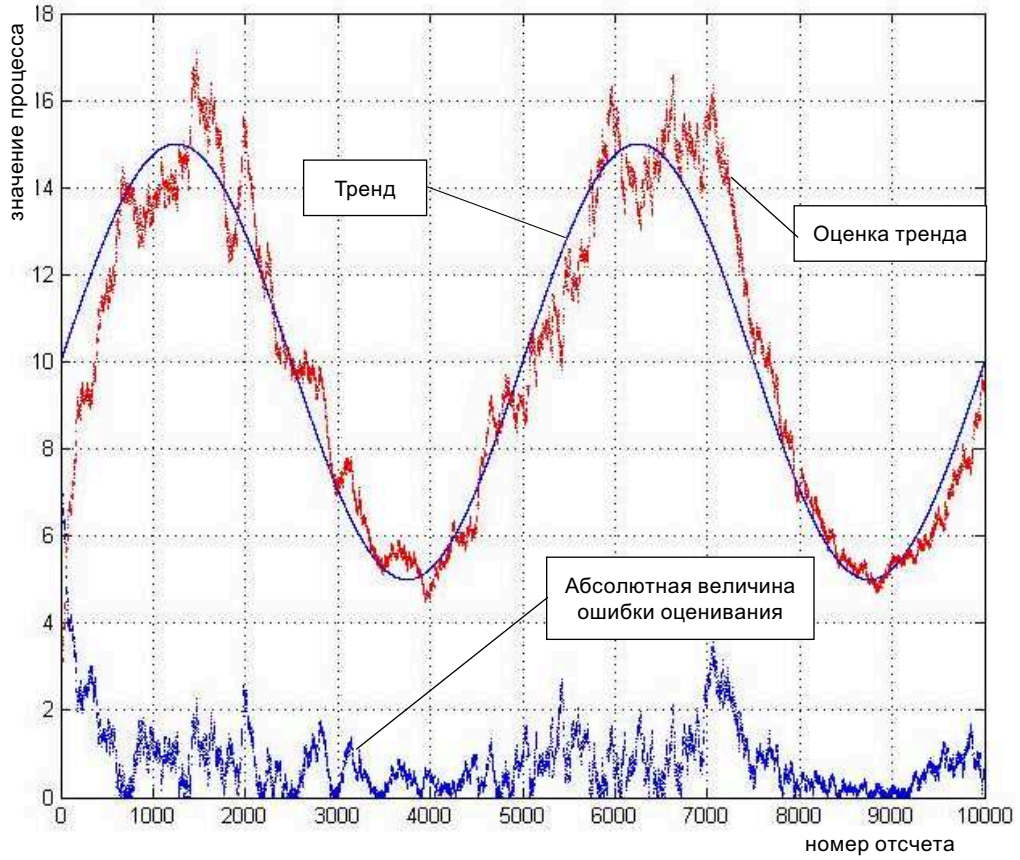


Рис. 3. Оценка периодической интенсивности СП алгоритмом МСА

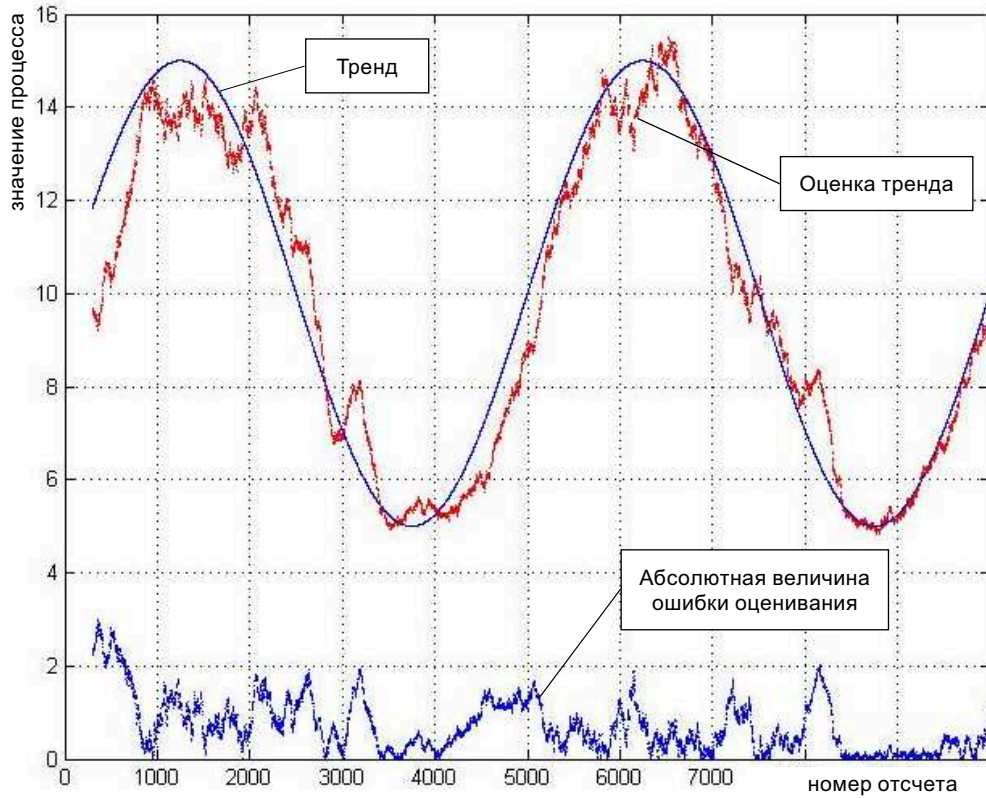


Рис. 4. Оценка периодической интенсивности СП алгоритмом СО

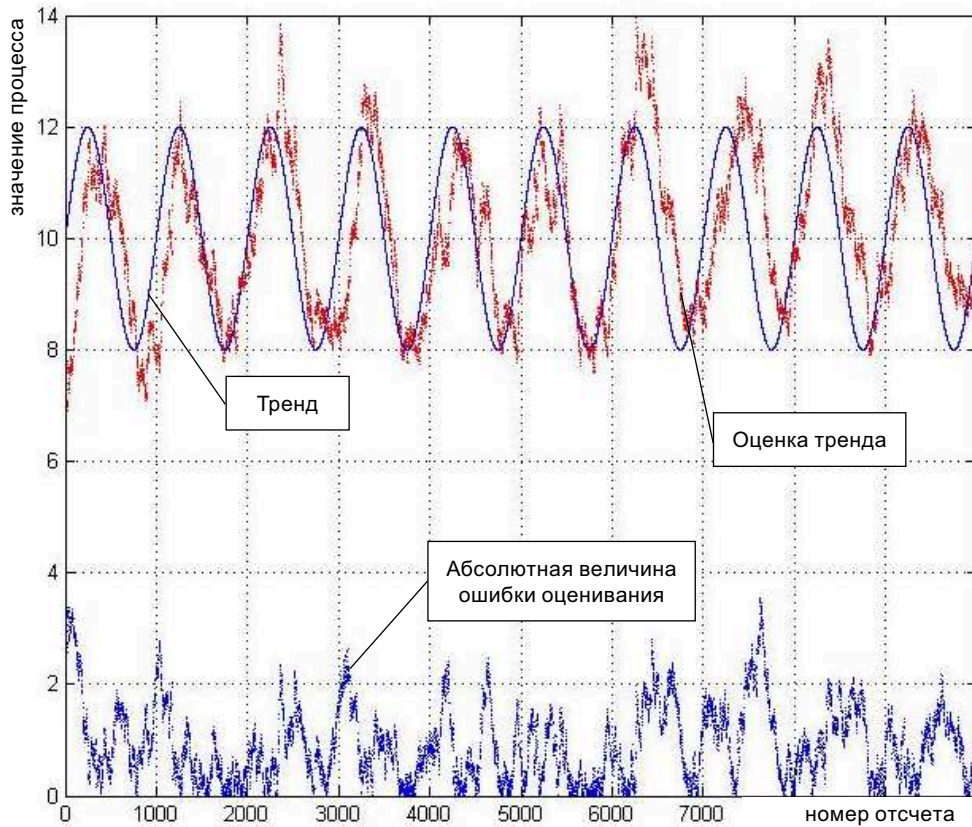


Рис. 5. Оценка периодической интенсивности СП с увеличенной частотой алгоритмом МСА

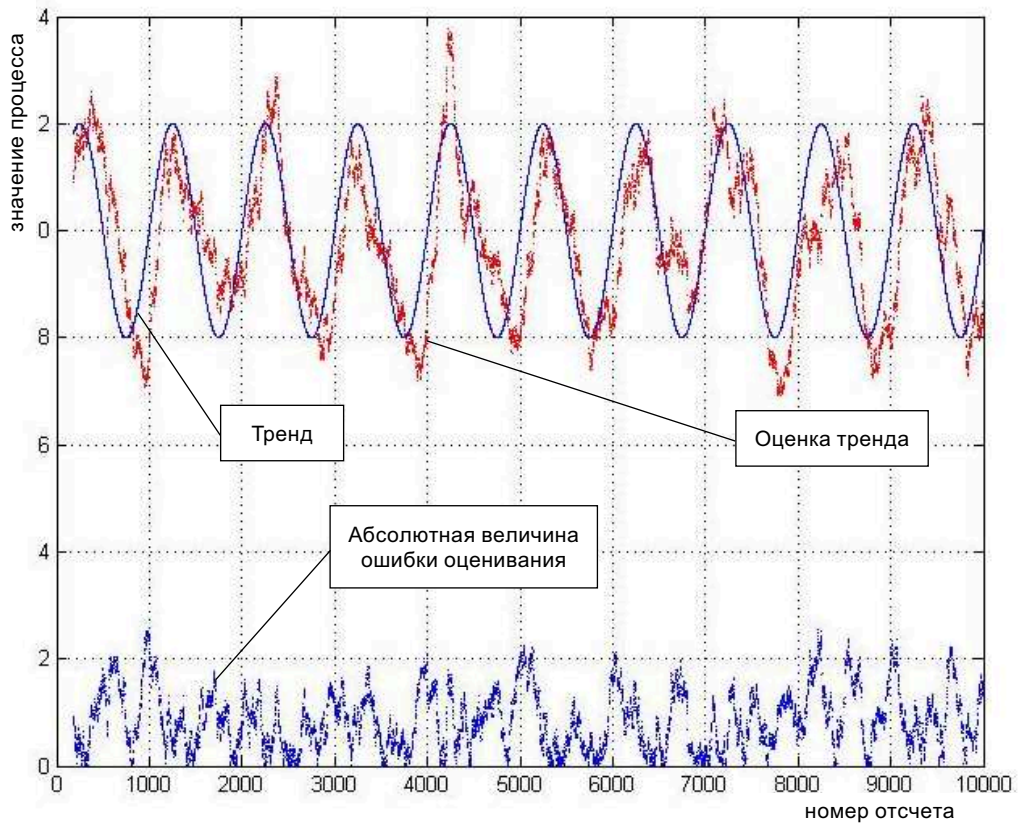


Рис. 6. Оценка периодической интенсивности СП с увеличенной частотой тренда алгоритмом СО

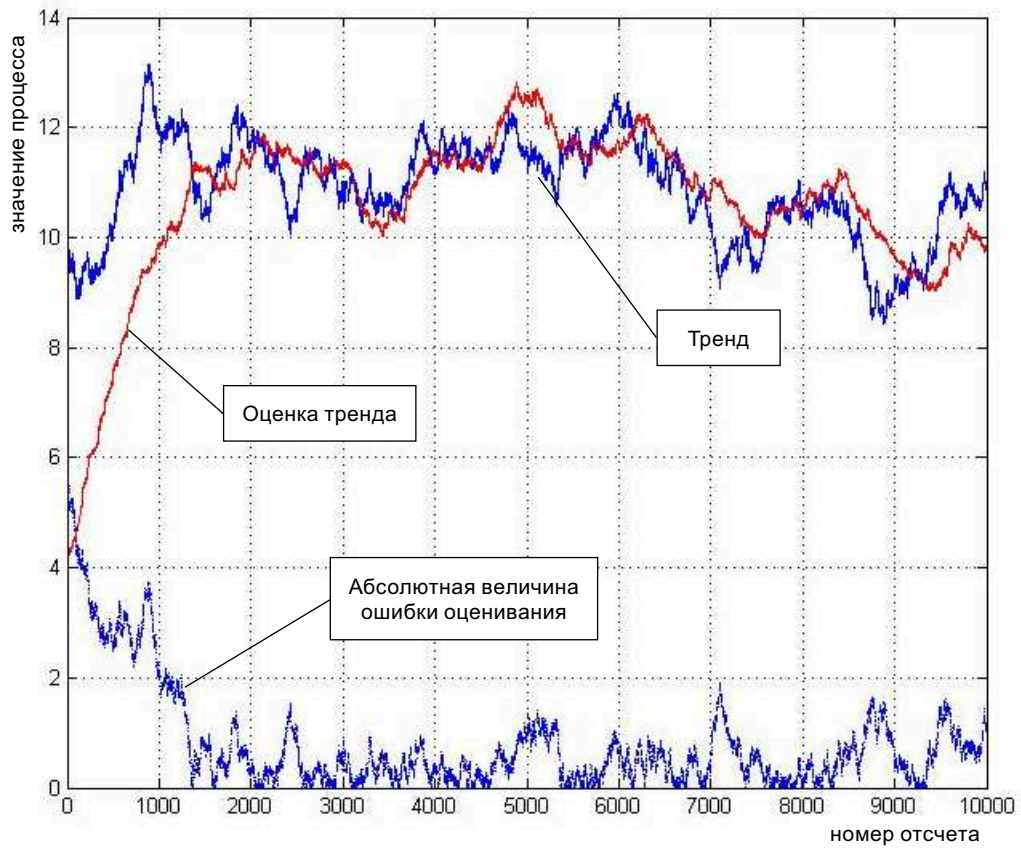


Рис. 7. Оценка стохастической интенсивности СП (процесс APP первого порядка) алгоритмом МСА

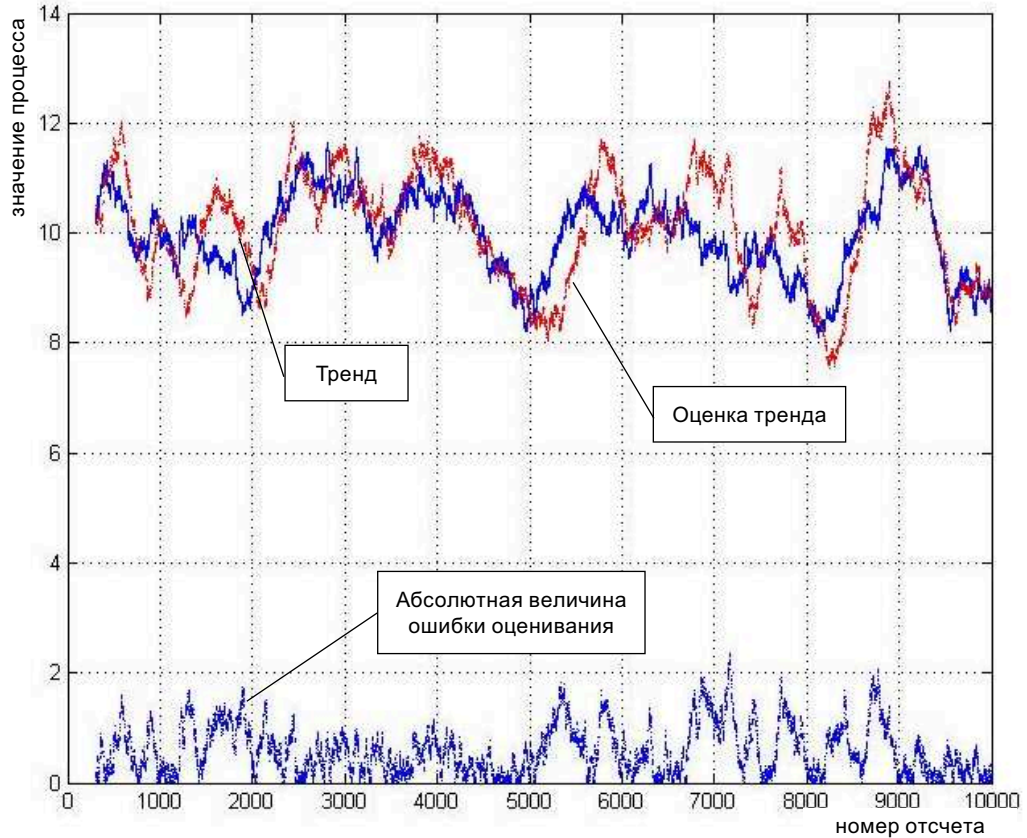


Рис. 8. Оценка стохастической интенсивности СП (процесс APP первого порядка) алгоритмом СО

По результатам проведенного численного эксперимента можно судить о динамических характеристиках предложенных алгоритмов. На рисунках 7 и 8 представлены данные по результатам оценивания стохастической интенсивности СП для алгоритмов МСА и СО, соответственно.

Коэффициент корреляции процесса АРР в данных реализациях численных экспериментов равен 0,999.

Полученные данные показывают, что время переходного процесса у алгоритма МСА выше, чем у алгоритма СО, но время реакции на изменение интенсивности СП у алгоритма МСА меньше, чем у алгоритма СО, хотя для многих задач управления МСС эти различия не имеют принципиального значения. Математическое ожидание модуля ошибки оценивания алгоритмов МСА и СО составляет не более 5–8% от абсолютного значения оцениваемой интенсивности СП.

Направлениями дальнейших исследований могут быть процедуры адаптивного определения коэффициента шага для МСА и адаптивного выбора размера «скользящего окна» для алгоритма СО, а также синтез адаптивных процедур фаззификации текущих оценок тренда для их использования в интеллектуальных системах управления сетью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных : пер. с англ. – М. : Мир, 1989. – 544 с.
2. Дымарский Я.С., Крутякова Н.П., Яновский Г.Г. Управление сетями связи: принципы, протоколы, прикладные задачи / под ред. проф. Г.Г. Яновского. – М. : ИТЦ «Мобильные коммуникации», 2003. – 384 с.
3. Вишневский В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М. : Техносфера, 2003. – 512 с.
4. Концептуальные основы автоматизации управления защищенными мультисервисными сетями / И.Б. Саенко [и др.] // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2011. – № 3. – С. 30–39.
5. К разработке комплекса математических моделей управления защищенной мультисервисной сетью / С.А. Агеев [и др.] // Автоматизация процессов управления. – 2012. – № 3 (29). – С. 8–18.
6. Саенко И.Б., Агеев С.А. Основы математического моделирования задач управления защищенными мультисервисными сетями // Международный конгресс по информатике: информационные системы и технологии : матер. межд. науч. конгресса, Республика Беларусь, Минск, 31 октября – 3 ноября 2011 года, в 2 ч. Ч. 1 / редкол.: С.В. Абламейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2011. – С. 282–287.
7. Корячко В.П., Перепелкин Д.А. Анализ и проектирование маршрутов передачи данных в корпоративных сетях. – М. : Горячая линия – Телеком, 2012.
8. Столлингс В. Современные компьютерные сети. – 2-е изд. – СПб. : Питер, 2003. – 783 с.
9. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. – М. : Мир, 1979. – 600 с.
10. Невельсон М.Б., Хасьминский Р.З. Стохастическая аппроксимация и рекуррентное оценивание. – М. : Наука, 1972. – 304 с.
11. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пособие. – 2-е изд. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 496 с.
12. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов : пер. с англ. / под ред. В.Ф. Писаренко. – М. : Мир, 1974. – Кн. 1. – 406 с.
13. Агеев С.А. Адаптация по величине шага псевдоградиентного алгоритма компенсации коррелированных помех // Методы обработки сигналов и полей : сб. науч. тр. – Ульяновск : УлПИ, 1992. – С. 23–27.
14. Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети : учеб. пособие. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 224 с.