На правах рукописи

Герасимова Юлия Андреевна

МЕТОДЫ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА КОРРЕЛИРОВАННЫХ ДАННЫХ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ТЕОРИИ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Специальность 05.13.18 —
«Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Воронеж — 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Поволжском Государственном Университете Телекоммуникаций и Информатики на кафедре высшей математики.

Научный руководитель:	доктор физико-математических наук, профессор **Блатов Игорь Анатольевич**
Официальные оппоненты:	**Новиков Игорь Яковлевич,** доктор физико-математических наук, профессор, Воронежский государственный университет, кафедра функционального анализа и операторных уравнений, профессор
	Задорин Александр Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, Омский филиал Института математики им. С.Л.Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория Математического моделирования в механике, заведующий
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Томский Государственный Архитектурно-Строительный Университет

Защита состоится 19 июня 2019 г. в 15:10 на заседании диссертационного совета Д 212.038.20 при Воронежском государственном университете по адресу: 394018, г. Воронеж, Университетская пл., 1, ауд. 333.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского государственного университета и на сайте http://www.science.vsu.ru/dissertations/7224/Диссертация_Герасимова_Ю.А..pdf.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 394018, г. Воронеж, Университетская пл., 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.038.20.

Автореферат разослан 12 апреля 2019 года.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.038.20,
д-р физ.-мат. наук Шабров Сергей Александрович

Общая характеристика работы

Диссертация посвящена разработке метода и алгоритмов вейвлет-анализа сильнокоррелированных случайных величин и их программной реализации.

Актуальность темы. Прогресс современных методов построения и анализа коммуникационных сетей требует развития целого ряда разделов вычислительной математики и математического программирования, аппаратов математического моделирования и реализации более эффективных, в том числе с точки зрения быстродействия и использования вычислительных ресурсов, алгоритмов. С течением времени изменяется подход к решению некоторых классов задач, находятся новые способы их решения, разрабатываются новые методики, позволяющие преодолеть множество препятствий. Однако при решении некоторых задач возникают новые, оригинальные проблемы.

Продолжительное время считалось, что математическая модель трафика описывается классическим Пуассоновским распределением. Но в 1993-1994 гг. стало известно, что трафик в реальных сетях передачи данных является самоподобным процессом (Шелухин О.И., Цыбаков Б.С., Beran J., Leland W., Park K.). Это проявляется в том, что имеется медленно убывающая зависимость между величинами трафика в разные моменты времени, а также в том, что трафик сбивается в пачки данных и эти пачки выглядят статистически подобными.

В настоящее время есть необходимость проведения анализа трафика коммуникационной сети с учетом его корреляционных свойств. Классические методы теории массового обслуживания применимы для анализа математических моделей систем, обрабатывающих только некоррелированный трафик (Kleinrock L.). Но трафик, как случайный процесс, обладает самоподобными свойствами, одним из признаков которых является сильная коррелированность последовательностей данных. Это требует разработки новых высокоэффективных численных методов, позволяющих учитывать корреляционные свойства трафика.

Общий метод решения таких проблем заключается в предварительном выполнении над исходыми данными некоторого обратимого декоррелирующего преобразования, целью которого является снижение коррелированности (Умняшкин С.В., Ахмед Н., Рао К.Р.).

Таким образом, в настоящее время существует актуальная научно-техническая проблема развития и обоснования эффективных методик и алгоритмов, решения задач ослабления коррелированности последовательностей сильнокоррелированных случайных величин. Настоящая диссертационная работа направлена на решение этой проблемы путем применения методов вейвлет-преобразования на базе сплайнов к исходной последовательности данных, характеризующих трафик.

Большой скачок в развитии теории вейвлет-функций произошел в 80-х годах XX века благодаря ряду таких ученых, как И. Добеши (*I. Daubechies*), Й. Майер (*Y. Meyer*), К. Чуи (*C.K. Chui*), С. Малла (*S.G. Mallat*) и других. В России первые работы были опубликованы в начале 1990-х годов, и с каждым годом интерес к этой теме продолжает расти.

Одними из основных методик, разработанных на базе функций такого рода, стали вейвлет-преобразования, широко применяемые для обработки нестационарных сигналов, изображений и временных рядов. Вейвлет-преобразования имеют ряд модификаций. В основном они различаются базисами, от свойств которых зависят их характеристики. Целесообразным является выбор базиса вейвлет-преобрзаования, адекватного задаче исследования.

Наиболее часто используемыми являются следующие виды базисов: базис Мейера, базис Морлета, Мексиканская шляпа, базис Добеши, сплайновые вейвлеты, Хаара, койфлеты, симлеты и т.д. Оптимальным набором свойств, необходимых для решения поставленной задачи, обладают сплайновые вейвлеты. Их исследование и применение к различным прикладным задачам проводилось в работах Б.М. Шумилова, И.Я. Новикова, И.А. Блатова, Ю.К. Демьяновича, Е.Е. Тыртышникова, В.А. Желудева, М. Фахмай (*M.F. Fahmy*) и других российских и зарубежных ученых.

Программное обеспечение, созданное в рамках данной работы получило свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ (№PR15002).

Цель работы. Разработка и развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования и численных алгоритмов для ослабления коррелированности последовательностей сильнокоррелированных случайных величин при анализе трафика в рамках решения задач теории массового обслуживания.

Реализация цели исследования осуществляется решением следующих **задач** как теоретического, так и практического характера:

1. Разработка и обоснование вычислительных алгоритмов быстрого прямого и обратного вейвлет-пребразований на базе полуортогональных сплайновых вейвлетов произвольной степени.
2. Анализ математической модели трафика коммуникативной сети. Исследование возможности и эффективности применения алгоритмов прямого и обратного преобразований на базе сплайновых вейвлетов для декорреляции данных при анализе трафика в рамках задач теории массового обслуживания.
3. Получение оценки коэффициентов корреляции при применении вейвлет-преобразований на базе сплайн-функций для общего случая.

4. Разработка комплекса программ для ЭВМ и проведение численных экспериментов для оценки декорреляционных свойств прямого и обратного вейвлет-преобразований на базе сплайнов в рамках задачи анализа математической модели трафика из теории массового обслуживания.

Объект исследования - трафик коммуникативных сетей, являющийся самоподобным процессом в реальных сетях передачи данных и его корреляционные свойства.

Предмет исследования - математические модели систем коммуникативных сетей, алгоритмы, программные меотды декорреляции данных, численные и аналитические методы построения оценок декоррелирующих свойств преобразований.

Методология и методы исследования. В диссертационной работе используются фундаментальные положения математического моделирования, вейвлет-анализа, аппарат целочисленного программирования, в частности, численные методы, методы аппроксимации и интерполяции, теория случайных процессов, теория параллельного программирования и теория разработки программного обеспечения.

Научная новизна. В работе получены следующие новые результаты:

1. Впервые выполнено исследование эффективности применения сплайновых вейвлетов к декорреляции последовательностей сильнокоррелированных случайных величин.
2. Впервые доказана эффективность применения сплайновых вейвлет-преобразований при анализе математической модели трафика комуникативной сети.
3. Впервые получены оценки корреляционных матриц вейвлет-преобразований на базе сплайн-функций для общего случая.
4. Впервые полуортогональные сплайновые вейвлет-функции были применены к математической модели «тяжелых хвостов» в рамках задачи их ослабления из теории массового обслуживания.
5. Разработаны оригинальные алгоритмы и комплексы программ для выполнения декорреляции трафика при решении задач теории массового обслуживания.

Область исследований. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 05.13.18 математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (физико-математические науки). Область исследования соответствует п.1 "Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений", п.2 "Развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей", п.5 "Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента".

Практическая значимость. Теоретическая и практическая значимость результатов и методов диссертационной работы заключается в возможности их использования в качестве инструментария для исследования математических моделей трафика комуникативных сетей. Разработана методика ослабления коррелированности последовательностей сильнокоррелированных случайных величин при анализе математической модели трафика в рамках задач теории массового обслуживания с применением сплайнового вейвлет-преобразования. Представленная программа для ЭВМ позволяет получить декоррелированную последовательность данных для её дальнейшего анализа классическими методами теории массового обслуживания. Это может найти применение как для проектирования систем коммуникационных сетей, так и для промышленных систем анализа характеристик трафика.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика декорреляции последовательностей сильнокоррелированных случайных величин при анализе математической модели трафика в рамках решения задач теории массового обслуживания.
2. Оценка корреляционных матриц вейвлет-преобразований на базе сплайн-функций для общего случая.
3. Результаты численного моделирования процесса ослабления коррелированности при анализе математической модели трафика в рамках решения задач теории массового обслуживания.
4. Комплекс пргограммдля ЭВМ для вейвлет-анализа сильнокоррелированных случайных величин и результаты его апробации.

Личный вклад автора. Все результаты представленной работы получены лично автором.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: «Информационные технологии и нанотехнологии» в г. Самара в 2015, 2016, 2017 и 2018 гг., «Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий» в г. Воронеж в 2016 и 2017 гг., XXII и XXIV Российских НТК профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов в г. Самара, РосИнфоКом-2017 «Актуальные вопросы телекоммуникаций» в г. Самара и «Понтрягинские чтения XXVI» г. Воронеж.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 16 печатных изданиях, 3 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 3 в рецензируемых изданиях, входящих в систему цитирования Scopus, 10 — в тезисах докладов.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений. Полный объем диссертации **109** страниц текста с **25** рисунками и **4** таблицами. Список литературы содержит **89** наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приведен обзор научной литературы по изучаемой проблеме, сформулирована цель, поставлены задачи работы, изложена научная новизна и практическая значимость представляемой работы, а также приведена ее структура и положения, выносимые на защиту.

В главе 1 ставится задача декорреляции данных при анализе модели самоподобного трафика, проводится обзор существующих методов декорреляции временных рядов, анализ их недостатков и формулируются требования к разрабатываемому методу.

Рассматривается математическая модель трафика коммуникационной сети, обладающего самоподобными свойствами, т.е. имеется медленно убывающая зависимость между величинами трафика в разные моменты времени, а также трафик сбивается в пачки данных и эти пачки выглядят статистически подобными.

Ставится задача об отыскании метода, позволяющего устранить или ослабить коррелированность входного потока данных, чтобы стал возможным дальнейший ее анализ. Пусть $X = (x_1,x_2,...)$ - стационарный случайный процесс; $r(k)$ - коэффициент корреляции, который не зависит от времени $t \in N$; $r(k) = r(-k)$, $k \in Z_+$; $\mu = M(X)$ - математическое ожидание; $D = \sigma^2 = D(X)$ - дисперсия процесса X.

Известно, что процесс X называется строго самоподобным процессом в широком смысле с параметром H, если его корреляционная функция гиперболически затухает:

$$R(k) = \frac{\sigma^2}{2}\left[(k+1)^{2H} - 2k^{2H} + (k-1)^{2H}\right], k \neq 0 \qquad (1)$$

Также известно, что коэффициенты корреляции определяются соотношением

$$r(k) = \frac{R(k)}{R(0)} = \frac{R(k)}{\sigma^2},$$

тогда коэффициент корреляции самоподобного процесса имеет вид:

$$r(k) = \frac{1}{2}\left[(k+1)^{2H} - 2k^{2H} + (k-1)^{2H}\right] \qquad (2)$$

Многочисленные измерения математической модели сетевого трафика показали, что он лучше всего описывается так называемыми распределениями с «тяжелыми хвостами» (PTX). Будем говорить, что случайная величина X имеет распределение с «тяжелым хвостом», если

$$P\left(X \geqslant x\right) = 1 - F(x) = x^{-\alpha}L(x),$$

где $L(x)$ – медленно затухающая функция на бесконечности, параметр $0 < \alpha < 2$ называется индексом «хвоста».

Для декорреляции временных рядов принимается решение использовать некоторое ортогональное преобразование, применяемое к исходной последовательности данных, с целью проведения последующего анализа уже над обработанным (декоррелированным) рядом. В параграфе 1.2 рассматриваются и анализируются известные преобразования – Карунена Лоэва, Хаара, Хартли, дискретное косинусное-преобразование и другие.

Таким орбазом, поставлена задача декорреляции данных при анализе модели самоподобного трафика и выдвинуты требования к разрабатываемому методу: выполнение большинства общих требований, предъявляемых к декоррелирующим преобразованиям (ортогональность, гладкость, симметричность и другие); высокая эффективность декорреляционных свойств преобразования (близкая к эффективности преобразования Карунена-Лоэва); наличие быстрых алгоритмов реализации.

В главе 2 представляется концепция решения проблемы, теоретические и методические обоснования выбранного направления исследования и разрабатывается общая методика решения поставленных задач. Она посвящена сплайновым вейвлет-базисам.

В параграфе 2.1 дается классификация сплайновых вейвлетов по их основным свойствам. Обосновывается выбор полуортогональных сплайновых вейвлетов для решения поставленных в диссертации задач.

В параграфах 2.2 и 2.3 излагаются некоторые необходимые для дальнейшего факты из теории сплайнов и строятся полуортогональные сплайновые вейвлеты на конечном отрезке.

Пусть $[a,b]$ – произвольный отрезок, m - некоторое натуральное число, n_0 - такое целое, что $2^{n_0} < 2m-1 < 2^{n_0+1}$. Рассмотрим семейство $\Delta = \{\Delta_n, n = n_0, n_0+1, ...\}$ разбиений отрезка $[a,b]$ Δ_n: $a = x_0^n < x_1^n < x_{2^n}^n = b$ с постоянным шагом $h = h_n = \frac{b-a}{2^n}$. Пусть $N_{m,k}(x)$ – B-сплайн степени m с носителем $(x_k,...,x_{k+m},t)$.

На каждом разбиении Δ_n рассмотрим пространство сплайнов $L_n = S(\Delta_n, m-1, 1)$. Тогда для каждого $k \geqslant n_0$ пространство $S(\Delta_n, m-1, 1)$ можно представить в виде прямой суммы $L_k = L_{n_0} \oplus W_{n_0+1} \oplus W_{n_0+2} \oplus ... \oplus W_k$, где через W_k обозначено ортогональное дополнение пространства L_{k-1} до пространства L_k. Искомый вейвлет-базис строится как объединение базиса в L_{n_0} и всех базисов в пространствах $W_n, n_0 \leqslant n \leqslant k$.

Для того, чтобы построить базис в ортогональном дополнении W_n пространства L_{n-1} до L_n, зафиксируем $n \geqslant n_0 + 1$. Будем считать, что Δ_n продолжено на всю числовую ось с тем же шагом h_n. Обозначим $N_m - 1, j, n$ - B-сплайн на разбиении Δ_n.

Зафиксируем некоторое целое $i \geqslant 0$, такое, что открезок $\left[x_i^{n-1}, x_{i+2m-1}^{n-1}\right]$ целиком содержится в $[a,b]$. Будем искать функцию

$\psi_{i,n}(x) \in W_n$ в виде

$$\psi_{i,n}(x) = \sum_{j=2i}^{2i+3m-2} \alpha_j N_{m-1,j,n} \tag{3}$$

Для того, чтобы $\psi_{i,n}(x) \in W_n$ достаточно потребовать выполнения условий

$$(\psi_{i,n}, N_{m-1,j,n-1}) = 0, k = i - m + 1, i - m + 2, ..., i + 2m - 2 \tag{4}$$

поскольку остальные условия ортогональности выполняются автоматически в силу дизъюнкции носителей.

Справедлива формула

$$\psi_{i,n}(x) = \psi_{0,n}\left(2^{n-n_0}x - i\frac{b-a}{2^{n_0-1}}\right), \tag{5}$$

т.е. совокупность вейвлет-функций получается путем сдвига одной единственной функции $\psi_{0,n}(x)$.

В параграфе 2.5 описаны алгоритмы прямого и обратного быстрого дискретного вейвлет-преобразования и его модификация для быстрого вычисления элементов матриц СЛАУ. А также представлен вариант распараллеливания этих алгоритмов для возможности их оптимального использоваиня в многопроцессорных системах.

Задача прямого быстрого ДВП состоит в отыскании всех коэффициентов разложения (рис. 1)

$$\{d_{0j}, -m+1 \leqslant j \leqslant 2^{n_0} - 1\} \bigcup \bigcup_{i=1}^{k-n_0} \{c_{ij}, -m+1 \leqslant j \leqslant 2^{n_0+i-1} - m\} \tag{6}$$

некоторой заданной функции

$$f = \{f_{ij}\}, 0 \leqslant i \leqslant 2^k - 1, 0 \leqslant j \leqslant s \tag{7}$$

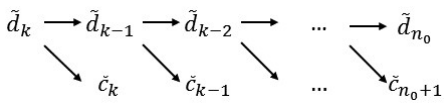

Рис. 1 — Отыскание коэффициентов разложения

Цель алгоритма обратного быстрого ДВП - восстановить все значения $f_{ij}, 0 \leqslant i \leqslant 2^k - 1, 1 \leqslant j \leqslant s$

$$f = \sum_{j=-m+1}^{2^{n_0}-1} d_{0j}\varphi_{j,n_0} + \sum_{i=1}^{k-n_0} \sum_{j=-m+1}^{2^{n_0+i-1}-m} c_{ij}\psi_{j,n_0+i} \tag{8}$$

$$\begin{tikzcd}
\tilde{d}_0 \arrow[r] & \hat{d}_1 \arrow[r] & \dots \arrow[r] & \hat{d}_{k-n_0} \\
\check{c}_1 \arrow[ur] & \check{c}_2 \arrow[ur] & \dots \arrow[ur] &
\end{tikzcd}$$

Рис. 2 — Восстановление значений функции по заданному набору коэффициентов

по заданном набору коэффициентов (6) (рис. 2).

В приложении Б представлены листинги программного кода для реализации описанных выше алгоритмов.

Таким образом, в главе 2 представлен метод и даны алгоритмы решения поставленной задачи. Обоснован выбор базиса вейвлет-функций. Представлены некоторые рассчётные параметры и графики базисных и вейвлет-функций.

Глава 3 посвящена декоррелирующим свойствам полуортогональных сплайновых вейвлетов. Здесь приводятся оценки корреляционных матриц сплайновых вейвлет-преобразований.

Определим преобразование случайной последовательности X формулой

$$Y_i = (TPX)_i,\ 0 \leqslant i \leqslant n, \tag{9}$$

где T - дискретное вейвлет-преобразование (ДВП) в пространстве $S(\Delta,m-1,1)$.

Поставим задачу оценки элементов ковариационной матрицы $\tilde{K} = \{\tilde{k}_{ij}\}, \tilde{k}_{ij} = cov(Y_i,Y_j), 0 \leqslant i,j \leqslant n$ по заданной ковариационной матрице $K = \{k_{ij}\}$, $k_{ij} = cov(X_i,X_j)$.

Рассматрим матрицу

$$\hat{K} = \begin{pmatrix} \hat{K}_{11} & \hat{K}_{12} & \cdots & \hat{K}_{1k-n_0+1} \\ \hat{K}_{21} & \hat{K}_{22} & \cdots & \hat{K}_{2k-n_0+1} \\ & & \cdots & \\ \hat{K}_{k-n_0+11} & \hat{K}_{k-n_0+12} & \cdots & \hat{K}_{k-n_0+1k-n_0+1} \end{pmatrix}, \quad \hat{K}_{p\nu} = \{\hat{k}_{ij}^{p\nu}\}. \tag{10}$$

, где

$$\hat{k}_{ij}^{p\nu} = \int_0^n \int_0^n K(t,\tau)\psi_{i,p}(t)\psi_{j,\nu}(\tau)dtd\tau, \quad (p \geqslant 2, \nu \geqslant 2), \tag{11}$$

$$\hat{k}_{ij}^{1\nu} = \int_0^n \int_0^n K(t,\tau)\varphi_{i,n_0}(t)\psi_{j,\nu}(\tau)dtd\tau, \tag{12}$$

$$\hat{k}_{ij}^{p1} = \int_0^n \int_0^n K(t,\tau)\psi_{i,p}(t)\varphi_{j,n_0}(\tau)dtd\tau, \tag{13}$$

$$\hat{k}_{ij}^{11} = \int_0^n \int_0^n K(t,\tau)\varphi_{i,n_0}(t)\varphi_{j,n_0}(\tau)dtd\tau. \tag{14}$$

Теорема 1. *Для элементов* $\hat{k}_{ij}^{pp+s}$,$\hat{k}_{ij}^{p+sp}$ *матрицы* $\hat{K}_{pp+s}, \hat{K}_{p+sp}$ *справедливы оценки* ($p \geqslant 2$)

$$|\hat{k}_{ij}^{pp+s}| \leqslant C \cdot 2^{(1-\alpha)(k-p)} \cdot 2^{-(3/2-\alpha)s}.$$

$$\cdot \begin{cases} 1, -4m+2 \leqslant j - i \cdot 2^s \leqslant (4m-2) \cdot 2^s, \\ \frac{1}{(1+2^{-\frac{s}{m+\alpha}}(|j-i\cdot 2^s|-(4m-2)\cdot 2^s))^{m+\alpha}}, j - i \cdot 2^s > (4m-2) \cdot 2^s, \\ \frac{1}{(1+2^{-\frac{s}{m+\alpha}}(|j-i\cdot 2^s|-4m+2))^{m+\alpha}}, j - i \cdot 2^s < -4m+2, \end{cases} \tag{15}$$

$$|\hat{k}_{ij}^{p+sp}| \leqslant C \cdot 2^{(1-\alpha)(k-p)} \cdot 2^{-(3/2-\alpha)s}.$$

$$\cdot \begin{cases} 1, -4n+2 \leqslant i - j \cdot 2^s \leqslant (4m-2) \cdot 2^s, \\ \frac{1}{(1+2^{-\frac{s}{m+\alpha}}(|i-j\cdot 2^s|-(4m-2)\cdot 2^s))^{m+\alpha}}, i - j \cdot 2^s > (4m-2) \cdot 2^s, \\ \frac{1}{(1+2^{-\frac{s}{m+\alpha}}(|i-j\cdot 2^s|-4m+2))^{m+\alpha}}, i - j \cdot 2^s < -4m+2, \end{cases} \tag{16}$$

Из доказанной теоремы вытекает

Теорема 2. *Для элементов матрицы* $\hat{K}$ *справедливы оценки* ($p \geqslant 2$)

$$|\hat{k}_{ij}^{pp+s}| \leqslant C \cdot 2^{(1-\alpha)(k-p)} \cdot 2^{-(3/2-\alpha)s} \frac{1}{(1+|i-\frac{j}{2^s}|)^{m+\alpha}}, \tag{17}$$

$$|\hat{k}_{ij}^{p+sp}| \leqslant C \cdot 2^{(1-\alpha)(k-p)} \cdot 2^{-(3/2-\alpha)s} \frac{1}{(1+|j-\frac{i}{2^s}|)^{m+\alpha}}, \tag{18}$$

Таким образом, в третьей главе дано теоретическое обоснование эффективности ослабления коррелированности данных с помощью вейвлет-преобразвоания на базе сплайновых вейвлетов. Оно представлено в виде теорем и следствий.

В главе 4 представлены выполненные научные исследования и численные эксперименты, проанализированы полученные результаты, а также рассмотрена возможность использования результатов исследований в исследуемой области знаний.

Для проведения численного эксперимента был развернут виртуальный кластер на платформе для организации управления облачной инфраструктурой и виртуальными окружениями. Виртуальный кластер включает в себя также контроллер с сетевой операционной системой и клиентов, генерирующих трафик. В результате трафик был зафиксирован в виде последовательностей, характеризующих время между соседними полученными пакетами на каждом узле, а также время задержки при передаче пакета между узлами.

Для сравнения полученных результатов были вычислены суммы модулей коэффициентов корреляции $\sum_{i=0}^{N-1} |r_i|$.

После применения к исходной последовательности прямого преобразования, получаем новые последовательности. На графике наглядно отображено ослабление коррелированности последовательности случайных величин.

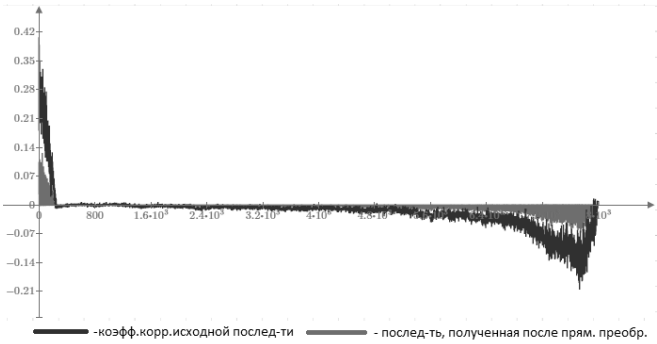

Рис. 3 — Последовательность данных, полученная после прямого сплайнового линейного вейвлет-преобразования

В рамках численного эксперимента (см. табл. 1) получены следующие научно-прикладные результаты:

1. Подтверждно предположение, что преобразования, основанные на линейных и квадратичных сплайновых вейвлетах, позволяют ослабить коррелированность последовательностей сильнокоррелированных случайных величин, характеризующих трафик;
2. При увеличении степени сплайна декоррелирующие свойства преобразования усиливаются;
3. В некоторых случаях использование сплайнового ДВП позволяет получить наилучший результат среди рассматриваемых типов преобразований.

Приложение Б содержит листинги программного кода, который ориентирован на следующую инфраструктуру: язык разработки – C++, среда разработки - Microsoft Visual Studio 15.2, компилятор - Microsoft C/C++ Compiler Version 19.10.25019, процессор – четырехъядерный процессор Intel Core i5-3470 CPU 3.20 GHz. Для расспараллеливания алгоритмов использована библиотека Open Multi-Processing API.

Основные выводы и результаты

В рамках диссертационной работы получены следующие научные и научно-прикладные результаты:

1. Методы декорреляции последовательностей сильнокоррелированных случайных величин при анализе трафика в рамках решения задач теории массового обслуживания.

Таблица 1 — Результаты численных экспериментов

Тип преобразования	**Номер выборки**				
	1	2	3	4	5
Исходная выборка	208,277	423,233	22,314	52,425	43,891
Преобразование Фурье	22,619	24,799	5,044	10,497	5,973
Преобразование Хаара	22,059	19,670	5,287	9,052	5,625
Преобразование Добеши (d4)	20,129	23,528	7,704	9,312	4,439
Биортогональное 4/4	18,568	21,214	6,810	11,418	3,495
Койфлетное ДВП	19,485	18,204	6,580	14,951	3,636
Сплайновое ДВП (m=2)	20,640	18,468	5,377	10,124	3,660
Сплайновое ДВП (m=3)	18,107	18,811	5,110	10,009	3,963

2. Теоремы об оценке корреляционных матриц вейвлет-преобразований на базе сплайн-функций для общего и частного случаев.
3. Алгоритмы расчета и результаты численных экспериментов по определению декоррелирующих свойств сплайновых вейвлетов.
4. На основе разработанных алгоритмов создан комплекс прикладных программ, защищенных свидетельством о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Публикации автора по теме диссертации

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. *Герасимова Ю. А.* Оценка эффективности применения быстрого дискретного сплайнового вейвлет-преобразования для ослабления коррелированности дискретно заданных данных / Ю. А. Герасимова, И. Блатов // Вестник ВГТУ. — 2015. — Т. 11, № 5. — С. 64—66.
2. *Герасимова Ю. А.* Анализ характеристик коррелированного трафика при использовании вейвлет-преобразования / Ю. А. Герасимова, И. Блатов, И. Карташевский // Радиотехника. — 2017. — Т. 1, № 5. — С. 123—130.
3. *Герасимова Ю. А.* Применение сплайновых вейвлетов к декорреляции временных рядов / Ю. А. Герасимова, И. Блатов, И. Карташевский // Математическое моделирование. — 2018. — Т. 30, № 6. — С. 60—75.

Свидетельства о регистрации программных продуктов

4. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №PR15002 // Фонд алгоритмов и программ СО РАН.

В журналах из реферативной базы данных Scopus

5. *Gerasimova U.* Application of fast discrete wavelet transformation on the basis of spline wavelet for loosening correlation of sequence of data in mass service theory / U. Gerasimova, I. Blatov, I. Kartashevskiy // CEUR Workshop Proceedings "Proceedings of International Conference Information Technology and Nanotechnology, ITNT 2015". — 2015. — P. 242–245. — URL: http://ceur-ws.org/Vol-1490/paper28.pdf.
6. *Gerasimova Y.* Decreasing correlation in strongly correlated sequence using wavelets / Y. Gerasimova, I. Blatov, I. Kartashevskiy // 2nd International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2015 - Conference Proceedings. — 2015. — P. 18–20.
7. *Gerasimova Y.* Characteristic of decorrelation properties of spline wavelet transformation / Y. Gerasimova // Procedia Engineering 3. 3rd International Conference "Information Technology and Nanotechnology", ITNT 2017. — 2017. — Vol. 201. — P. 463–467.

Прочие журналы, материалы конференций, статьи в сборниках

8. *Герасимова Ю. А.* Сравнительный анализ алгоритмов быстрого дискретного wavelet-преобразования / Ю. А. Герасимова // XXII Российская научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов. — 2015. — С. 366.
9. *Герасимова Ю. А.* Применение сплайновых вейвлетов к ослаблению коррелированности последовательностей сильнокоррелированных случайных величин / Ю. А. Герасимова // Материалы Международной конференции Воронежская весенняя математическая школа «Понтрягинские чтения – XXVI». — 2015. — С. 58—60.
10. *Герасимова Ю. А.* Применение быстрого дискретного вейвлет-преобразования на базе сплайновых вейвлетов для ослабления коррелированности последовательностей данных при решении задач теории массового обслуживания / Ю. А. Герасимова, И. Блатов, И. Карташевский // Информационные технологии и нанотехнологии. Материалы Международной конференции и молодежной школы. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (Национальный исследовательский университет)». — 2015. — С. 20—22.

11. *Герасимова Ю. А.* Оценка эффективности применения быстрого дискретного вейвлет-преобразования на базе сплайновых вейвлетов для ослабления коррелированности последовательностей данных / Ю. А. Герасимова, И. Блатов // Современные методы пиркладной математики, теории управления и компьютерных технологий (ПМТУКТ-2015). Сборник трудов VIII международной конференции. — 2015. — С. 64—66.

12. *Герасимова Ю. А.* Применение финитных полуортогональных сплайновых вейвлетов к декорреляции временных рядов / Ю. А. Герасимова, И. Блатов // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2016). Материалы Международной конференции и молодёжной школы. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)»; Институт систем обработки изображений РАН. — 2016. — С. 905—910.

13. *Герасимова Ю. А.* Об оценках элементов корреляционных матриц самоподобных процессов в вейвлет-базисах / Ю. А. Герасимова, И. Блатов // Современные методы пиркладной математики, теории управления и компьютерных технологий (ПМТУКТ-2016). Сборник трудов IX международной конференции. — 2016. — С. 54—56.

14. *Герасимова Ю. А.* Анализ декоррелирующих свойств сплайновых вейвлет-преобразований / Ю. А. Герасимова // Материалы конференции XXIV Российская научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов. — 2017. — С. 417.

15. *Герасимова Ю. А.* Характеристика декоррелирующих свойств сплайнового вейвлет-преобразования / Ю. А. Герасимова // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2017). Сборник трудов III международной конференции и молодежной школы. Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева. — 2017. — С. 988—990.

16. *Герасимова Ю. А.* Характеристика декоррелирующих свойств вейвлет-преобразований для анализа сигнала при решении задач теории массового обслуживания / Ю. А. Герасимова // Материалы научно-технической конференции РосИнфоКом-2017 «Актуальные вопросы телекоммуникаций». — 2017. — С. 160—161.

17. *Gerasimova Y. A.* Parallel algorithm of spline-based wavelet transform / Y. A. Gerasimova // Информационные технологии и нанотехнологии. Сборник трудов ИТНТ-2018. Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева. — 2018. — С. 2018—2021.

Герасимова Юлия Андреевна

МЕТОДЫ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА КОРРЕЛИРОВАННЫХ ДАННЫХ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ТЕОРИИ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать ___.___._____. Заказ № _____
Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.
Типография _____