

На правах рукописи



А В Р А М Е Н К О Д Е Н И С В Л А Д И М И Р О В И Ч

**ЭФФЕКТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ
СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА СИГНАЛОВ
ЯРКОСТНОЙ МОДУЛЯЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ
НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА
ПРОНИ**

2.2.13. Радиотехника, в том числе системы
и устройства телевидения

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание учёной степени
к а н д и д а т а технических наук

Рязань 2022

Работа выполнена на кафедре радиотехнических систем ФГБОУ ВО
«Рязанский государственный радиотехнический университет
им. В.Ф. Уткина»

Научный руководитель: Андреев Владимир Григорьевич,
доктор технических наук, профессор ка-
федры радиотехнических систем ФГБОУ
ВО «Рязанский государственный радио-
технический университет им.
В.Ф. Уткина», г. Рязань.

Официальные оппоненты: Мясникова Нина Владимировна,
доктор технических наук, профессор ка-
федры «Автоматика и телемеханика»
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный
университет», г. Пенза;
Шевгунов Тимофей Яковлевич,
кандидат технических наук, доцент кафед-
ры «Теоретическая радиотехника» ФГБОУ
ВО «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский уни-
верситет)», г. Москва.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Владимирский государственный
университет имени Александра Гри-
горьевича и Николая Григорьевича Столе-
товых», г. Владимир.

Защита состоится «23» сентября 2022 года в 12 часов на заседании
диссертационного совета 24.2.375.03 (Д 212.211.04) в ФГБОУ ВО
«Рязанский государственный радиотехнический университет
им. В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке
ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический универси-
тет им. В.Ф. Уткина» и на сайте www.rsgeu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью,
просим направлять по адресу: 390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1,
ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический универси-
тет им. В.Ф. Уткина».

Автореферат разослан « ____ » _____ 2022 года.

Учёный секретарь диссертационного совета
д-р техн. наук, доцент

Г.В. Овечкин

Общая характеристика работы

Актуальность работы исследования заключается в необходимости увеличения качественных показателей систем обработки радиотехнических сигналов в условиях плавного изменения мощности сигнала во время наблюдения. Решение задачи сводится к использованию метода, который учитывает характер изменения мощности радиотехнического сигнала.

С помощью современных методов обработки радиотехнических сигналов, основанные на развитии теории статистической радиотехники, созданы эффективные радиотехнические системы и устройства обработки радиосигналов. В то же время эти методики не нацелены на регистрацию итоговых спектрально-корреляционных свойств моделируемых и обрабатываемых процессов вследствие того, что эти свойства во многих случаях выражены в плохо формализуемом виде.

Анализ спектра изменений интенсивности сигналов, содержащих малое число отсчётов, параметрическими методами авторегрессии AR, скользящего среднего MA, авторегрессии - скользящего среднего ARMA, MUSIC и пр., а также классическими непараметрическими (коррелограммы, периодограммы) методами во многих случаях не позволяет вскрывать периодические изменения, например, в яркости световых отражений от вращающегося космического объекта (КО), что не даёт возможность ответить на вопросы, связанные с дистанционной диагностикой технического состояния космического аппарата (КА). Эффективность параметрических методов состоит преимущественно в сочетании высокой спектральной разрешающей способности и выявлении самого факта наличия периодических компонент при обработке последовательностей данных, состоящих из жёстко ограниченного количества наблюдений. Однако при этом предполагается, что мощность анализируемого процесса неизменна во время его наблюдения.

Стоит отметить, что существенным недостатком традиционных методов спектрального анализа представляется гипотеза о неизменной мощности сигнала за время его наблюдения. Классические методы анализа спектра не принимают во внимание плавное изменение мощности отражённого сигнала, в частности во время фотометрического мониторинга, что свойственно серии наблюдений за космическим объектом, который, двигаясь рядом с зенитом, имеет в большинстве случаев максимальную яркость, а при низких углах места — минимальную. В связи с этим применение модели, которая учитывает результат изменения мощности процесса, позволяет значительно повысить качество спектрального оценивания отражённого КО сигнала яркостной модуляции.

Немаловажным аспектом спектрального анализа является то, что в большинстве случаев необходимо досконально знать только конкретные участки спектра процесса, а за рамками данных спектральных диапазонов допускается ограничиться только приблизительной оценкой спектрального портрета. Ниже анализируются возможности увеличения эффективности функционирования радиотехнических систем путём модификации метода наименьших квадратов Прони для спектрального анализа, плавно изменяющего мощность процесса, что позволяет в ряде практических случаев преодолеть недостатки известных подходов к спектральному оцениванию стационарных случайных процессов.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в разработку современных методов цифрового спектрального анализа и моделирования случайных процессов внесли отечественные и зарубежные ученые, такие как А.В. Диденко, Л.М. Гольденберг, В.И. Тихонов, В.В. Быков, Л.П. Ярославский, П.А. Бакулев, В.П. Денисов, Ю.Г. Сосулин, В.Ф. Писаренко, Ю.М. Коршунов, В.В. Витязев, В.А. Лихарев, А.В. Никитин, М.Б. Свердлов, В.Д. Захарченко, А.Ф. Васильев, В.И. Кошелев, Н.В. Мясникова, Е.В. Верстаков, А.К. Муртазов, В.Г. Андреев, А. Рахман, М.Л. Ван Бларикюме, Р. Кумаресан, Г. Дженкинс и Д. Ваттс, М.С. Барлетт, Р.Б. Блэкман, Дж. В. Тьюки, Б. Уидроу, Ф. Дж. Хэррис, Дж. Картер, Г. Эмилиани, С.Л. Марпл-мл. и др.

Цель исследования: повышение точности радиотехнических систем и устройств в условиях плавного изменения мощности сигнала.

В целях достижения результатов исследования необходимо решить следующие **задачи**:

1 Разработать алгоритмы оценки спектральной моды на основе модификации метода наименьших квадратов Прони, позволяющей исключить аномальные ошибки измерения доминантной частоты.

2 Получить аналитические выражения и алгоритм расчёта методом наименьших квадратов Прони матричных коэффициентов векторной переопределенной авторегрессионной (АР) модели для отображения набора статистически связанных процессов с выходов разнообразных датчиков или каналов радиотехнической системы.

3 Разработать усовершенствованный метод построения многомерного спектра Прони с использованием взвешивания векторных наблюдений, дающий возможность компенсации возмущений модели и учёта изменений отношения сигнал-шум во время наблюдения процесса.

4 Разработать модифицированный двусторонний метод наи-

меньших квадратов Прони, учитывающий характер изменения интенсивности процесса световых отражений во время наблюдения. Использование этого модифицированного метода позволит уменьшить относительное отклонение оцененных доминантных частот колебаний яркости светового потока от истинных.

5 Обосновать метод спектрального анализа многочастотных светоотражений от биологической ткани модифицированным методом Прони для оценки частоты сердечных сокращений по короткой выборке наблюдений. Данная методика позволит уменьшить относительное отклонение оцененных доминантных частот от истинных при жёстких ограничениях на время наблюдения.

Методы проведения исследования. В диссертационной работе в ходе проведения исследований используются методы, основанные на параметрическом моделировании случайных процессов, статистической теории радиотехнических систем, количественных методах поиска экстремума целевой функции комплексных аргументов. Числовые результаты анализа собраны путём экспериментальных исследований, статистического моделирования и аналитических вычислений. Используются методы векторной алгебры, поиска максимальных и минимальных значений функции нескольких комплексных переменных и собственных значений комплексных матриц.

Полученные результаты по совершенствованию методов синтеза параметрических моделей радиотехнических сигналов для уменьшения объемов данных, характеризующих их с заданной точностью, имеют **научное и практическое значение**. Соответственно улучшается помехозащищённость радиотехнических систем, эффективность которых повышается за счёт использования предлагаемых методов учёта априорной информации о характере спектрально-временных портретов радиотехнических сигналов.

Основные положения, выносимые на защиту

1 Алгоритм расчёта методом наименьших квадратов Прони матричных коэффициентов переопределённой векторной модели позволяет увеличить точность оценки спектральной моды в 2...5 раз по сравнению с векторной моделью того же порядка. Выигрыш достигается путём учёта ошибок линейного предсказания, выходящих за длину р лага.

2 Усовершенствованный метод построения многомерного спектра Прони с использованием взвешивания векторных наблюдений позволяет уменьшить относительное отклонение оценённых частот от истинных в 1,5...3 раза по сравнению с модифицированным методом наименьших квадратов Прони за счёт учёта изменений отношения

сигнал-шум в ходе наблюдения процесса.

3 Модифицированный двусторонний метод наименьших квадратов Прони для спектрального анализа плавно меняющего свою интенсивность процесса световых отражений даёт возможность повысить точность оценки доминантных частот в 1,5...5 раз по сравнению с авторегрессионным методом. Эффективность обеспечивается оценкой характера изменения мощности сигнала во время наблюдения.

Внедрение результатов диссертационного исследования. Результаты диссертации внедрены в разработки компании ООО «САНИ» (г. Рязань), в учебный процесс ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина», а также в исследования астрономической обсерватории ФГБОУ ВО «Рязанский государственный университет им. С.А. Есенина», подтверждением чему являются соответствующие акты внедрения.

Апробация работы. На следующих конференциях обсуждались и докладывались результаты диссертационного исследования:

1 IX Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы развития инновационной деятельности в новом тысячелетии», г. Новосибирск, Международный независимый институт Математики и Систем «МиС», 2014.

2 Questions of science: theoretical and practical view: materials of the International research and practice conference, Westwood, Canada, Accent Graphics Publishing & Communications, 2015.

3 XXXV Международная научно-практическая конференция «Наука вчера, сегодня, завтра», г. Новосибирск, АНС «СибАК», 2016.

4 I молодежная научная конференция-конкурс ВЭС ВКС «Космическая безопасность XXI века: проекты и решения», г. Москва, МГТУ им. Баумана, 2017.

5 The Second Mongolia-Russia-Vietnam Workshop on Numerical Solution of Integral and Differential Equations (NSIDE-2017), Irkutsk, 2017.

6 II Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки и производства», г. Рязань, ИП Коныхин А.В. (Book Jet), 2017.

7 7th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO – 2018), Budva, Montenegro, 2018.

8 Ist International aerospace symposium, the silk road, Dolgoprudny, Moscow Region, МИПТ, 2018.

9 VIII Всероссийская молодежная научная конференция «Актуальные вопросы биомедицинской инженерии», г. Саратов, ФГБОУ ВО «СГТУ им. Ю.А. Гагарина», 2018.

10 8th Mediterranean conference on embedded computing (MECO'2019), Montenegro, Bar, 2019.

11 V Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Орбита молодежи и перспективы развития российской космонавтики», г. Санкт-Петербург, БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, 2019.

12 III международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2020», г. Рязань, РГРТУ им. Уткина В.Ф., 2020.

13 10th Mediterranean conference on embedded computing (MECO'2021), Montenegro, Bar, 2021.

Публикации. Всего опубликованы 32 научные работы, получены охранные документы на интеллектуальную собственность (патент на способ и свидетельства о государственной регистрации алгоритмов и программ для ЭВМ), в том числе непосредственно по теме диссертации 28 работ: 11 статей, из них 8 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по специальности 2.2.13, 14 тезисов докладов на научно-технических конференциях, среди которых 3 материала докладов, включенные в Международную реферативную базу данных «Scopus», 2 материала доклада, включённые в реферативную базу данных по мировым научным публикациям «Web of Science». Получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, реализующие предложенные алгоритмы.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа включает в себя введение, 3 главы, заключение, список используемой литературы из 155 наименований и четыре приложения. Диссертация содержит 151 страницу, включая 112 страниц основного текста, 7 таблиц и 40 рисунков.

Содержание диссертации

Во введении проведён мониторинг современного положения вопросов обработки радиотехнических сигналов. Анализ показывает, что существует ряд вопросов, решение которых позволит значительно развить практические аспекты создания радиотехнических систем диагностики и зондирования. Приводится краткий анализ основных проблем в области спектрального анализа радиотехнических сигналов для повышения точности их спектрального оценивания. Обосновываются актуальность темы диссертационных исследований и степень разработанности темы, формулируются цели и задачи исследований. Представлены основные положения, выносимые на защиту, приведены данные о внедрении результатов, апробации работы и публикациях, представлена структура диссертации. Вводятся многократно приме-

няемые в тексте диссертации аббревиатуры и условные обозначения, определения основных понятий, терминов, которые построены по единому принципу. Приводятся благодарности лицам и организациям, которые оказали помощь в работе над диссертацией.

В первой главе проводится анализ эффективности алгоритма расчёта методом наименьших квадратов Прони матричных коэффициентов переопределённой векторной модели. Приведен пример оценки эффективности алгоритма по критерию оценки относительного отклонения ΔF оцененных частот \hat{F} вращения КО от истинных частот F для трёх цветов R, G, B видимого диапазона.

Результаты слежения за объектом оптических наблюдений, доставляющиеся по N различным информационным каналам, рассмотрим в качестве реализации \mathbf{X} дискретного векторного N -мерного случайного процесса конечной связанности:

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_t, \dots, \mathbf{x}_{T-1}] \quad (1)$$

где $\mathbf{x}_t = [x_{0,t}; x_{1,t}; \dots; x_{n,t}; \dots; x_{N-1,t}]^T$ — N -мерный векторный t -й временной отсчёт процесса наблюдения; $x_{n,t}$ — значение t -го наблюдения в n -м канале; $n=0,1,\dots,N-1$; T — знак транспонирования. Математическое модельное представление N -мерного процесса наблюдения сводится к форме:

$$\mathbf{x}_t = \sum_{k=1}^K \mathbf{Z}_k^t \mathbf{h}_k + \mathbf{e}_t, \quad (2)$$

или в развёрнутом виде:

$$\begin{bmatrix} x_{0,t} \\ x_{1,t} \\ \vdots \\ x_{n,t} \\ \vdots \\ x_{N-1,t} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^K \begin{bmatrix} z_{0,k}^t & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & z_{1,k}^t & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & z_{n,k}^t & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & z_{N-1,k}^t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h_{0,k} \\ h_{1,k} \\ \vdots \\ h_{n,k} \\ \vdots \\ h_{N-1,k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{0,t} \\ e_{1,t} \\ \vdots \\ e_{n,t} \\ \vdots \\ e_{N-1,t} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где \mathbf{h}_k — N -мерный вектор-столбец k -й комплексной амплитуды $\mathbf{h}_k = [h_{0,k}; h_{1,k}; \dots; h_{n,k}; \dots; h_{N-1,k}]^T$ (компонента, не зависящая от времени), \mathbf{Z}_k^t — диагональная $(N \times N)$ -мерная матрица k -й комплексной экспоненты для t -го векторного временного отсчёта, представляющая компоненту зависящую от времени, \mathbf{e}_t — N -мерный вектор-столбец, $\mathbf{e}_t = [e_{0,t}; e_{1,t}; \dots; e_{n,t}; \dots; e_{N-1,t}]^T$, представляющий собой t -й векторный временной отсчёт процесса ошибки аппроксимации. Независящие от времени t параметры $h_{n,k}$ вектора \mathbf{h}_k и зависящие от

времени t элементы $z_{n,k}^t$ матрицы \mathbf{Z}_k^t рассчитываются из зависимостей:

$$h_{n,k} = A_{n,k} \exp(i\theta_{n,k}), \quad (4)$$

$$z_{n,k}^t = \exp[(\alpha_{n,k} + i2\pi F_{n,k})t/T], \quad (5)$$

где $A_{n,k}$ — амплитуда, $\alpha_{n,k}$ — коэффициент затухания k -й комплексной экспоненты; $\theta_{n,k}$ — начальная фаза, $F_{n,k}$ — частота k -й синусоиды в n -м канале, i — мнимая единица.

Метод наименьших квадратов Прони, состоящий из трех стадий, сводится к подгонке модели из K комплексных экспонент и решению задачи полиномиальной факторизации. Первая стадия заключается в оценке авторегрессионных параметров коэффициентов линейного предсказания по принципу ковариационного метода Юла – Уолкера. Вторая стадия состоит в отыскании корней $z_{n,k}$ полинома, сформированного из коэффициентов линейного предсказания. С помощью найденных корней $z_{n,k}$ можно определить коэффициент затухания $\alpha_{n,k}$ и частоту $F_{n,k}$ k -й синусоиды (комплексной экспоненты) n -й компоненты векторного процесса \mathbf{X} (1):

$$\alpha_{n,k} = T \ln |z_{n,k}|, \quad (6)$$

$$F_{n,k} = \frac{T}{2\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{Im}\{z_{n,k}\}}{\operatorname{Re}\{z_{n,k}\}} \right), \quad (7)$$

где $\operatorname{Im}\{\cdot\}$, $\operatorname{Re}\{\cdot\}$ — операторы выделения мнимой и действительной компонент соответственно.

Существенным недостатком изложенного метода является получение неточных оценок коэффициентов $\alpha_{n,k}$ затухания при заметном уровне (отношение сигнал-шум менее $-20 \dots -30$ дБ) аддитивного шума. Вместе с тем для векторных процессов, состоящих из K затухающих или возрастающих по амплитуде комплексных экспонент, существует возможность повысить адекватность моделирования при наличии шума путем использования информации о взаимной корреляции временных отсчетов $x_{n,t}$ в разных каналах наблюдения. Для определения параметров гармонических компонент, описываемых методом Прони, предлагается использование векторной переопределенной модели, учитывающей старшие j -е отсчеты при $(p+P) \geq j > p$, где p — порядок модели, с глубиной переопределенности P .

Вектор $\tilde{\mathbf{a}} = [\tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \dots, \tilde{a}_p]^T$ коэффициентов переопределенной авторегрессионной модели рассчитывается на основе переопределенной системы линейных уравнений вида:

$$\tilde{\mathbf{X}}\tilde{\mathbf{a}} \rightarrow -\tilde{\mathbf{x}}, \quad (8)$$

запишем (8) для наглядного представления в форме:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_{p-1} & \mathbf{x}_{p-2} & \cdots & \mathbf{x}_0 \\ \mathbf{x}_p & \mathbf{x}_{p-1} & \cdots & \mathbf{x}_1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{x}_{2p-2} & \mathbf{x}_{2p-3} & \cdots & \mathbf{x}_{p-1} \\ \mathbf{x}_{2p-1} & \mathbf{x}_{2p-2} & \cdots & \mathbf{x}_p \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{x}_{2p+P-2} & \mathbf{x}_{2p+P-3} & \cdots & \mathbf{x}_{p+P-1} \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{a}} \rightarrow - \begin{bmatrix} \mathbf{x}_p \\ \mathbf{x}_{p+1} \\ \vdots \\ \mathbf{x}_{2p-1} \\ \mathbf{x}_{2p} \\ \vdots \\ \mathbf{x}_{2p+P-1} \end{bmatrix},$$

где $\tilde{\mathbf{X}}$ — $\{[N \cdot (p+P-1)] \times p\}$ -мерная матрица наблюдений моделируемого процесса, $\tilde{\mathbf{x}}$ — $[N \cdot (p+P-1)]$ -мерный вектор-столбец его векторных отсчётов.

Для дальнейшего решения преобразуем прямоугольную матрицу $\tilde{\mathbf{X}}$ в квадратную домножением обеих частей уравнения (8) на $\tilde{\mathbf{X}}^T$ или для комплексных отсчётов \mathbf{x}_t на матрицу $\tilde{\mathbf{X}}^H$:

$$\tilde{\mathbf{X}}^H \tilde{\mathbf{X}} \tilde{\mathbf{a}} \rightarrow -\tilde{\mathbf{X}}^H \tilde{\mathbf{x}}, \quad (9)$$

где $\tilde{\mathbf{X}}^H \tilde{\mathbf{X}}$ — квадратная $p \times p$ -мерная матрица, $\tilde{\mathbf{X}}^H \tilde{\mathbf{x}}$ — p -мерный вектор-столбец, H — эрмитово сопряжение.

Решая систему (9) нормальных уравнений, получаем оптимальное значение для вектора $\tilde{\mathbf{a}}$ авторегрессионных коэффициентов:

$$\tilde{\mathbf{a}} = -(\tilde{\mathbf{X}}^H \tilde{\mathbf{X}})^{-1} \tilde{\mathbf{X}}^H \tilde{\mathbf{x}}. \quad (10)$$

Третья, заключительная стадия представляет собой получение независимых от времени t комплексных параметров $h_{n,k}$, нахождение которых дает возможность определить амплитуду $A_{n,k}$ и начальную фазу $\theta_{n,k}$ k -й гармонической компоненты n -го канала из соотношений:

$$A_{n,k} = |h_{n,k}|, \quad (11)$$

$$\theta_{n,k} = \arctg \left(\frac{\text{Im}\{h_{n,k}\}}{\text{Re}\{h_{n,k}\}} \right). \quad (12)$$

Таким образом, в первой главе предложен алгоритм расчёта методом наименьших квадратов Прони коэффициентов перепределённой авторегрессионной модели, который основан на учёте более полного статистического материала (дополнительных P временных отсчётов). Выигрыш ΔF по сравнению с известными методами спектрального анализа достигается благодаря учёту ошибок линейного предсказания, выходящих за длину p лага.

Исследования показали, что величины ΔF значительно (от 2 до 5 раз) уменьшаются путём применения метода наименьших квадратов Прони для спектрального анализа (СА) плавно меняющего свою интенсивность процесса \mathbf{X} световых отражений от КО. В зависимости от выбора глубины переопределённости модели оптимальное (наименьшее) значение ΔF при $p=2\dots 10$ достигается при значении $P=6\dots 9$, а для большего порядка $p=11\dots 30$ глубину переопределённости необходимо выбирать $P=10\dots 30$.

Во второй главе диссертации разрабатывается усовершенствованный метод построения многомерного спектра Прони с использованием взвешивания векторных наблюдений, а также проводится оценка эффективности усовершенствованного метода Прони при построении параметрических моделей радиотехнических сигналов.

Принцип построения модели N -мерного метода Прони заключается в использовании импульсной характеристики векторного АР-фильтра с матричными коэффициентами \mathbf{A}_j авторегрессии, $j=1, 2, \dots, p$. Матричные АР-коэффициенты выразим из следующего выражения:

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{t-1} + \mathbf{e}_t, \quad (13)$$

где \mathbf{A} — $(N \times pN)$ -мерная матрица, состоящая из p $(N \times N)$ -мерных матричных коэффициентов \mathbf{A}_j авторегрессии, которая имеет вид: $\mathbf{A}=[\mathbf{A}_1; \mathbf{A}_2; \dots; \mathbf{A}_j; \dots; \mathbf{A}_p]$; $\hat{\mathbf{x}}_{t-1}$ — pN -мерный вектор-столбец предыдущих $t-p$ значений реализации \mathbf{X} , который имеет следующий вид:

$$\hat{\mathbf{x}}_{t-1}^T = [\mathbf{x}_{t-1}^T; \mathbf{x}_{t-2}^T; \dots; \mathbf{x}_{t-j}^T; \dots; \mathbf{x}_{t-p}^T]. \quad (14)$$

Для определения периодических изменений в реализации \mathbf{X} анализируемого процесса, связанных, к примеру, с вращением объекта наблюдения или с периодическим изменением его отражающих свойств, эффективно применение спектрального параметрического анализа, основанного на методе наименьших квадратов Прони. Это обусловлено узкополосным характером энергетического спектра анализируемых радиотехнических сигналов, а также учётом изменения мощности процесса во время наблюдения.

В условиях плавно изменяющейся мощности сигнала и учёта стохастической модели шума сформируем функцию затухания по отсчётам \mathbf{X} наблюдений аналогично аналитическому выражению (1). Чтобы не возмущать данную модель, предлагается взвесить отсчёты \mathbf{X} весовым вектором \mathbf{w}_t , где \mathbf{w}_t — N -мерный вектор-столбец t -го векторного отсчёта $\mathbf{w}_t = [w_{0,t}; w_{1,t}; \dots; w_{n,t}; \dots; w_{N-1,t}]^T$, имеющий смысл весов значимости наблюдаемых отсчётов, с компонентами:

$$w_{n,t} = \exp(-\alpha t^l), \quad n=0, 1, \dots, N-1; t=0, 1, \dots, T-1, \quad (15)$$

где $w_{n,t}$ — весовой коэффициент отсчётов данных, зависящий от оценки коэффициента затухания α , l — степенной параметр переменной времени t .

Значение $w_{n,t}$ выбираем из условия того, что весовые коэффициенты при $\alpha \rightarrow 0$ должны удовлетворять приближенному равенству $w_{n,t} \approx 1$ на всём временном интервале $t=0 \dots T-1$, а при $\alpha \gg 1$ (интенсивные затухания) значения $w_{n,t}$ стремятся к нулю для больших t ($t \rightarrow T$), отражая тенденцию потери оценки потенциальной точности отсчётов \mathbf{X} наблюдений при уменьшении мощности полезного сигнала и сохраняющейся интенсивности шумов. В связи с этим значение веса $0 \leq w_{n,t} \leq 1$ учитывает уменьшение точности оценки отсчётов \mathbf{X} при коэффициенте затухания $\alpha > 0$. При учёте величин $w_{n,t}$, формирующих векторы \mathbf{w}_t , изменения мощности сигналов $x_{n,t}$ за время T наблюдений можно учесть следующим образом:

$$\mathbf{y} = \mathbf{W}\mathbf{x}, \quad (16)$$

где $\mathbf{y}=[y_0; y_1; \dots; y_t; \dots; y_{T-1}]^T$ — реализация отражений от наблюдаемого объекта со взвешиванием отсчётов $\mathbf{X}=[x_0; x_1; \dots; x_t; \dots; x_{T-1}]^T$, $\mathbf{W}=\text{diag}(\mathbf{w})$ — квадратная матрица с элементами \mathbf{W}_t , образованными диагонализацией вектора $\mathbf{w}_t=[w_{0,t}; w_{1,t}; \dots; w_{n,t}; \dots; w_{N-1,t}]^T$. Для наглядного представления запишем выражение (16) в развёрнутом виде:

$$\begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ \vdots \\ y_t \\ \vdots \\ y_{T-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{W}_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \mathbf{W}_t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \mathbf{W}_{T-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ \vdots \\ x_t \\ \vdots \\ x_{T-1} \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{y}_t=[y_{0,t}; y_{1,t}; \dots; y_{n,t}; \dots; y_{N-1,t}]^T$, $\mathbf{x}_t=[x_{0,t}; x_{1,t}; \dots; x_{n,t}; \dots; x_{N-1,t}]^T$; $\mathbf{W}_t=\text{diag}(\mathbf{w}_t)=\text{diag}([w_{0,t}; w_{1,t}; \dots; w_{n,t}; \dots; w_{N-1,t}]^T)$, $t=0, 1, \dots, T-1$.

Для сопоставления предлагаемой методики оценки спектральной плотности мощности с классическим методом проанализируем экспериментальную последовательность \mathbf{y} , представленную тремя цветами (R, G, B) видимого диапазона. Фотопоследовательность отражений от вращающегося КА Cassini является реализацией модельного процесса. Серии снимков построены с помощью компьютерной графики по 3D модели конфигурации КА с регистрацией цветов его отдельных элементов. Метод создания изображения идентичен принятым в OpenGL принципам, в частности получению наборов векторных графических примитивов в виде линий, точек и многоугольников с последующим математическим анализом полученных данных и созданием растрово-

го изображения.

В рассматриваемом примере спектрального анализа сигнал $y_{n,t}$ от наблюдаемого объекта с учётом взвешивания отсчётов наблюдений представлен как $y_{n,t} = x_{n,t} w_{n,t}$, $n=0, 1, \dots, N-1$; $t=0, 1, \dots, T-1$.

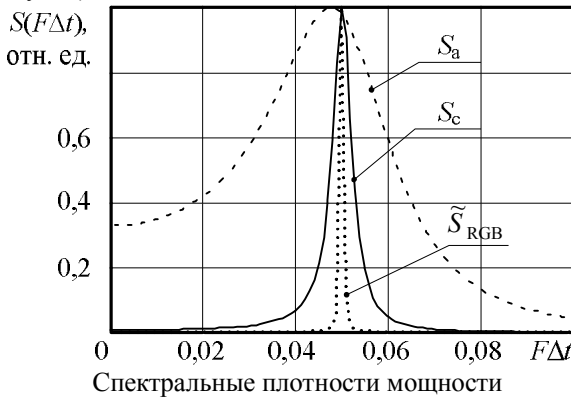
В виде реализации $\mathbf{Y}=[y_0, y_1, \dots, y_t, \dots, y_{T-1}]$ векторного процесса для трёхкомпонентной цветовой составляющей представим модель наблюдаемых изменений интенсивности световых отражений $y_{n,t}$ от угла ξ поворота КА в трёх (R, G, B) видимых диапазонах длин волн: $y_{0,t}$ — красный, $y_{1,t}$ — зеленый и $y_{2,t}$ — синий, при его вращении с шагом в один отсчёт наблюдения x_t и учёте величины $w_{n,t}$:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_{0,0} & y_{0,10} & \dots & y_{0,710} \\ y_{1,0} & y_{1,10} & \dots & y_{1,710} \\ y_{2,0} & y_{2,10} & \dots & y_{2,710} \end{bmatrix}, \quad (17)$$

подразумевая, что происходит наблюдение 2 оборотов КО при его вращении с шагом в 10° , т.е. $\xi=0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, \dots, 710^\circ$.

Избавиться от неинформативной постоянной составляющей и среднего значения, отличного от нуля, позволит центрирование по каждой компоненте матричного представления \mathbf{Y} .

Результативность предложенного метода рассмотрим в виде функции распределения мощности сигнала от относительной частоты $F\Delta t$ (см. рисунок).



На рисунке при СКО $\sigma=10^{-3}$, $\alpha=0,1$ и $l=0,1$ указаны: спектральная плотность мощности, построенная при использовании метода Пронни со взвешиванием наблюдений, подобранным экспериментальным путем — точечной линией; для сравнения по аналогии показаны спектральные плотности мощности, рассчитанные АР-методом

(при $p=18$) — пунктирной линией, а также спектральная плотность мощности контрольного сигнала — сплошной линией.

Эксперименты подтвердили, что величины ΔF значительно (от 1,5 до 3 раз) сокращаются путём использования весового вектора \mathbf{w} для компенсации возмущений модели предложенным методом, так как учитывается связь между оценкой коэффициента α затухания и весовыми коэффициентами w_i . Также стоит отметить, что относительные ошибки ΔF в большей степени уменьшаются путём экспериментально подобранной функции в виде весового вектора \mathbf{w} достоверности w_i отсчётов данных, точность которых падает с увеличением t из-за всё большего влияния шумов при затухании полезного сигнала с ходом времени наблюдения t . Это выявляет преимущества предложенного усовершенствованного метода наименьших квадратов Прони.

В третьей главе излагаются вопросы использования модифицированного двустороннего метода наименьших квадратов Прони для СА, плавно меняющего свою интенсивность процесса отражений ярких модуляций от КО. Проводится решение задачи медицинской неинвазивной диагностики на основе анализа спектра световых отражений от биологических тканей, а также оценка динамики сердечных сокращений по короткой (десятки ударов сердца) выборке наблюдений. Эффективность алгоритма определялась по критерию оценки относительного отклонения $\Delta \tilde{F}$ оцененных доминантных частот \tilde{F} вращения от истинных частот F для трёх цветов видимого диапазона.

В условиях плавно изменяемой мощности и учёта факта возрастания, а затем затухания сигнала сформируем модель по отсчётам \mathbf{X} наблюдений по формуле (1) путем «вырезания» вспышки аппроксимированной колоколообразной огибающей с исходного изображения (фрагмент от -90° до 90°). Для того чтобы не возмущать данную модель, предлагается взвесить отсчёты \mathbf{X} весовым вектором \mathbf{w}_t , где \mathbf{w}_t — N -мерный вектор-столбец t -го векторного отсчёта $\mathbf{w}_t = [w_{0,t}; w_{1,t}; \dots; w_{n,t}; \dots; w_{N-1,t}]^T$, имеющий смысл весов значимости наблюдаемых отсчётов, с компонентами:

$$w_{n,t} = \cos \left[\frac{\pi \cdot t}{T} - \frac{\pi}{2} \right]^l, \quad (18)$$

где $w_{n,t}$ — весовой коэффициент временных отсчётов, l — количественный множитель (степень).

Выбор $w_{n,t}$ обусловлен тем, что он позволяет учесть вариации отношения сигнал–шум при плавно изменяемой мощности процесса, так как при $t \rightarrow T/2$ весовые коэффициенты удовлетворяют приближительному равенству $w_i \approx 1$, а для $t \rightarrow T$ и $t \ll T$ значение $w_{n,t}$ стремится к нулю,

отражая тенденцию потери оценки потенциальной точности отсчётов \mathbf{X} наблюдений. В связи с этим значение веса $0 \leq w_{n,t} \leq 1$ учитывает уменьшение точности оценки отсчётов \mathbf{X} , при модуляции сигнала квадрата косинусоиды. При учёте величин $w_{n,t}$, формирующих вектор \mathbf{w} , изменения амплитуды сигнала x_t за время T наблюдений можем представить аналогично виду (16).

С целью количественной оценки эффективности предлагаемой методики введём формальный критерий. В качестве его рассмотрим относительные отклонения ΔF оцененных частот \hat{F} мерцаний от истинной частоты F для каждого из R, G, B цветов:

$$\Delta F = \frac{|F - \hat{F}|}{F} \cdot 100\%. \quad (19)$$

Значения \hat{F} , измеренных по красному, зелёному и синему цветам, при использовании весового вектора \mathbf{w} с компонентами $w_{n,t}$, указанными в выражении (18), и при $l=1$, составляют (соответственно): $F_R=1,69$ Гц, $F_G=1,67$ Гц и $F_B=1,67$ Гц. Истинная частота $F=1,5$ Гц установлена по объёмной модели спутника, параметрам его движения и взаимного расположения солнца и точки наблюдения.

Произведя расчёты, можем констатировать, что относительная ошибка оцененных частот для R, G, B цветов двусторонним методом Прони с глубиной переопределённости $P=9$ составляет: $\Delta F_R=13,3\%$, $\Delta F_G=11,3\%$, $\Delta F_B=11,3\%$, а относительная ошибка AP-метода превышает 100%. Усреднив относительное отклонение по трём цветам $\overline{\Delta F}_{\text{RGB}}=(\Delta F_R+\Delta F_G+\Delta F_B)/3$, получим $\overline{\Delta F}_{\text{RGB}}=11,9\%$.

Другая сфера применения диссертационных разработок представлена в виде анализа фотоплетизмографического сигнала от биологической поверхности. В качестве примера рассмотрены результаты фотоплетизмограммы пациента с пропуском потока излучения синего и красного цветов видимого диапазона электромагнитных волн.

Объективной оценкой эффективности предлагаемого метода послужит рассмотрение для каждого из R, B цветов относительных отклонений $\Delta \tilde{F}$ оцененных доминантных частот \tilde{F} от истинных частот F , выраженных в процентах, по критерию:

$$\Delta \tilde{F} = \frac{|\tilde{F} - F|}{F} \cdot 100\%. \quad (20)$$

Истинные частоты F найдены путём спектрального анализа более длительных (несколько минут) фотоплетизмографических наблюдений при числе отсчётов $T > 3\,000$.

Полученные числовые расчёты показывают, что относительные

ошибки оцененных доминантных частот двусторонним методом Прони с глубиной переопределённости $P=4$, $P=10$, усредненные по двум (R, B) цветам $\overline{\Delta\tilde{F}}_{RB} = (\Delta\tilde{F}_R + \Delta\tilde{F}_B)/2$, составляют: $\overline{\Delta\tilde{F}}_{RB} = 24,5\%$ и $52,5\%$ соответственно. Заметим, что относительная ошибка AP-метода в обоих случаях превышает 100 %.

Исследования подтвердили, что величины $\Delta\tilde{F}$ существенно (от 1,5 до 5 раз) уменьшаются путём использования двустороннего метода наименьших квадратов Прони для СА многочастотных световых отражений Y от биологических тканей. Выигрыши достигаются за счёт использования двухканального фотоплетизмографа, а также весовой матрицы W , учитывающей достоверность векторных отсчётов x , сигнала X .

В заключении подведены результаты диссертационной работы и сформулированы её ключевые научные и практические решения, которые сводятся к следующему:

1 Произведен анализ точности расчёта матричных коэффициентов векторной переопределенной авторегрессионной модели методом наименьших квадратов Прони при ограничениях на длину экспериментальной выборки.

2 Разработан усовершенствованный метод построения многомерного спектра Прони с использованием взвешивания векторных наблюдений для учёта изменения отношения сигнал-шум по мере уменьшения (увеличения) амплитуды сигнала затухающего процесса.

3 Разработан модифицированный двусторонний метод наименьших квадратов Прони, учитывающий плавное изменение интенсивности сигнала, т.е. факт его возрастания, а затем затухания. Это позволяет использовать априорную информацию о процессе изменения мощности радиотехнического сигнала за время наблюдения.

В приложениях изложены эффективность экспериментов, списки условных обозначений, сокращений и аббревиатур, терминов, копии актов о внедрении результатов, свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, а также программы для ЭВМ, полученные в процессе работы над диссертацией.

Выводы

Можно констатировать, что достигнута основная цель проведённых диссертационных исследований — решён комплекс научно-технических задач, имеющих большую значимость в повышении эффективности функционирования радиотехнических систем, заключающихся в увеличении их точности в задачах обнаружения и измерения параметров радиотехнических сигналов, в условиях коротких временных выборок и плавного изменения мощности сигнала.

Числовые результаты, полученные путём экспериментального исследования, статистического моделирования и аналитических расчетов средств обработки радиотехнических сигналов, подтвердили, что эффективность от использования найденных подходов к определению перечисленных научно-технических задач составляет по установленным критериям (16), (18), (19), (20) величину от 2,3 до 100 %, что подтверждает практическую целесообразность применения результатов диссертационной работы в различных областях современной науки и техники для обработки радиотехнических сигналов.

Список основных научных работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. Андреев В. Г., Федосов А. В., Авраменко Д. В. Спектральный анализ многочастотных отражений от вращающегося объекта методом дифференциальной электрофотомерии // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2016. – № 2 (56). – С. 3-10.
2. Авраменко Д. В. Спектральное оценивание многочастотных отражений от вращающегося космического объекта методом наименьших квадратов Прони // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2017. – № 3 (61). – С. 8-12.
3. Авраменко Д. В. Спектральное оценивание многочастотных отражений от вращающегося космического объекта усовершенствованным методом наименьших квадратов Прони // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2018. – № 1 (63). – С. 20-26.
4. Авраменко Д. В., Андреев В. Г. Спектральное оценивание многочастотных отражений от вращающегося космического объекта методом наименьших квадратов Прони со взвешиванием результатов наблюдений // Радиотехника. – 2018. – № 5. – С. 70-77.
5. Авраменко Д. В., Андреев В. Г. Анализ спектра излучений от астрономического объекта искусственного происхождения двусторонним методом Прони // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2018. – № 2 (64). – С. 3-8.
6. Авраменко Д. В., Андреев В. Г. Анализ спектра фотоплетизмографических сигналов модифицированным методом Прони // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2018. – № 3 (65). – С. 130-135.
7. Авраменко Д. В., Андреев В. Г. Метод распознавания изображений космических аппаратов на основе анализа спектра яркостной модуляции методом Прони // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2019. – № 3 (69). – С. 26-32.
8. Авраменко Д. В., Андреев В. Г. Сравнительный анализ методик спектрального оценивания многомерных сигналов методом Прони // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2021. – № 2 (76). – С. 17-24.

Материалы в изданиях, включённых в реферативные базы
«Web of Science», «Scopus»

9. Avramenko D. V., Andrejev V. G. Spectral Analysis of Light Reflections from Cosmic Objects by the Modified Prony's Method // 7th Mediterranean conference on embedded computing (MECO'2018), Montenegro, Bar, 2018. – P. 366-369. (IEEE Catalog number CFP1839T-PRT).

10. Avramenko D. V., Andrejev V. G. Spectral Estimation of the Photoplethysmographic Signal by the Double Sided Prony Method // 8th Mediterranean conference on embedded computing (MECO'2019), Montenegro, Bar, 2019. – P. 656-659. (ISBN 978-1-7281-1740-9).

Материалы в изданиях, включённых в реферативную базу «Scopus»

11. Avramenko D. V., Andrejev V. G. Evaluation of the spectral mode of the photometric signal by the two-sided Prony method // 10th Mediterranean conference on embedded computing (MECO'2021), Montenegro, Bar, 2021. – P. 1-4. (DOI:10.1109/MECO52532.2021.9460160)

Тезисы и материалы докладов

12. Авраменко Д. В. Спектральное оценивание световых отражений от вращающегося космического объекта методом наименьших квадратов Прони // Космическая безопасность XXI века: проекты и решения: I молодежная научная конференция-конкурс ВЭС ВКС. – М.: МГТУ им. Баумана, 2017.

13. Andrejev V. G., Fedosov A. V., Avramenko D. V., Tran N. L., Nguen T. P. Spectral analysis of vector multi-frequency signals by the differential method // The Second Mongolia-Russia-Vietnam Workshop on Numerical Solution of Integral and Differential Equations (NSIDE-2017), Irkutsk. – 2017. – P. 9-11.

14. Андреев В. Г., Авраменко Д. В. Обработка оптических сигналов от космических объектов методом наименьших квадратов Прони со взвешиванием наблюдений // Актуальные проблемы современной науки и производства: материалы II Всероссийской научно-технической конференции. – Рязань: ИП Коняхин А.В. (Book Jet), 2017. – С. 18-24.

15. Андреев В. Г., Авраменко Д. В. Спектральный анализ фотоплетизмографических сигналов двусторонним методом наименьших квадратов Прони // Актуальные проблемы современной науки и производства: материалы II Всероссийской научно-технической конференции. – Рязань: ИП Коняхин А.В. (Book Jet), 2017. – С. 24-29.

16. Andrejev V. G., Avramenko D. V. Improving the accuracy of spectral mode estimation of light reflections from space objects by two-way Prony method // 1st International aerospace symposium, the silk road, MIPT, Dolgoprudny, Moscow Region, 2018. – P. 107-110.

17. Андреев В. Г., Авраменко Д. В. Эффективная методика оценки спектральной моды фотоплетизмографического сигнала двусторонним методом Прони // Актуальные вопросы биомедицинской инженерии: сб. материалов VIII Всерос. молодеж. науч. конф. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2018. – С. 14-18. ISBN 978-5-7433-3281-6.

18. Авраменко Д. В., Андреев В. Г. Эффективная методика спектрального

анализа фотометрических сигналов от космических объектов двусторонним методом Прони // Всероссийский молодежный конкурс научно-технических работ «Орбита молодежи»: материалы. – СПб: БГТУ «Военмех», Инфо-Да, 2019. – С. 89-94. ISBN 978-5-94652-642-5.

Прочие публикации

19. Авраменко Д. В. Спектральное оценивание световых отражений от вращающегося космического объекта методом наименьших квадратов Прони // Методы и устройства обработки сигналов в радиотехнических системах: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань: РГРТУ. – 2017. – № 7. – С. 3-8.

20. Авраменко Д. В. Анализ спектра излучений от космического объекта модифицированным методом Прони // Методы и устройства формирования обработки сигналов в информационных системах: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. Ю.Н. Паршина. – Рязань: РГРТУ, 2018. – С. 48-53.

21. Андреев В. Г., Авраменко Д. В. Обработка оптических сигналов от наблюдаемых объектов методом наименьших квадратов Прони со взвешиванием наблюдений // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. – 2019. – Т. 28. – № 3. – С. 40-46. DOI: 10.26117/2079-6641-2019-28-3-40-46.

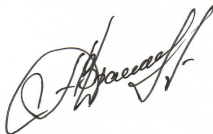
Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

22. Авраменко Д. В., Андреев В. Г. Программа для вычисления оценки спектральной плотности мощности процесса при наличии выраженной убывающей (нарастающей) мощности сигнала: свидетельство РФ № 2017660060 о гос. регистрации программ для ЭВМ / ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина». – М.: ФСИС, 2017.

23. Авраменко Д. В., Андреев В. Г. Программа для вычисления спектральных оценок многочастотных отражений при наличии выраженной убывающей (нарастающей) мощности сигнала: свидетельство РФ № 2017660704 о гос. регистрации программ для ЭВМ / ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина». – М.: ФСИС, 2017.

24. Авраменко Д. В., Андреев В. Г. Программа для вычисления спектральных оценок многочастотных отражений при наличии выраженной убывающей (нарастающей) мощности сигнала со взвешиванием наблюдений: свидетельство РФ № 2018615873 о гос. регистрации программ для ЭВМ / ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина». – М.: ФСИС, 2018.

Соискатель



Д.В. Авраменко

А в р а м е н к о Денис Владимирович

Эффективные алгоритмы спектрального анализа сигналов
яркостной модуляции изображений на основе
модифицированного метода Прони

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать __. __.22. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ _____.

Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина.
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.