

На правах рукописи



ЧАН ВАН АНЬ

**АЛГОРИТМЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО
СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА
РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ФОНЕ
КУСОЧНО-СТАЦИОНАРНЫХ ПОМЕХ**

2.2.13. Радиотехника, в том числе системы
и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2023

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

Научный руководитель: **А н д р е е в** Владимир Григорьевич,
доктор технических наук, доцент, профес-
сор кафедры радиотехнических систем
ФГБОУ ВО «Рязанский государственный
радиотехнический университет
им. В.Ф. Уткина», г. Рязань.

Официальные оппоненты: **Мясникова** Нина Владимировна,
доктор технических наук, профессор ка-
федры «Автоматика и телемеханика»
ФГБОУ ВО «Пензенский государствен-
ный университет», г. Пенза;
Шевгун Тимофей Яковлевич,
кандидат технических наук, доцент ка-
федры «Теоретическая радиотехника»
ФГБОУ ВО «Московский авиационный
институт (национальный исследовате-
льский университет)», г. Москва.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный
университет им. С.А. Есенина» (подраз-
деление «Астрономическая обсервато-
рия»), г. Рязань.

Защита состоится **«15» сентября 2023 года в 12 часов** на заседа-
нии диссертационного совета **24.2.375.03** 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 <http://www.rsreu.ru>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 года.

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



Г.В. Овечкин

Общая характеристика работы

Актуальность работы исследования заключается в необходимости повышения эффективности алгоритмов спектрального оценивания радиотехнических сигналов на фоне аддитивных кусочно-стационарных помех.

В настоящее время проблема учёта вносимых мешающим воздействием, которое изменяется во время наблюдения, искажений при спектральном анализе и уменьшения негативного влияния аддитивных кусочно-стационарных по мощности шумовых помех в радиотехнике играет важную роль во многих прикладных областях, связанных с астрономией, обработкой световых сигналов и их отражений, технической и медицинской диагностикой, радио-, тепло-, гидролокацией, а также экологическим и медицинским мониторингом и т.д.

В реальных радиотехнических системах помимо собственных источников шума существуют внешние источники электромагнитного излучения, которые способны значительно повлиять на конечный результат спектрального анализа, поэтому борьба с ними является одной из важных задач обработки радиотехнических сигналов. В диссертации показано, что в условиях воздействия нестационарных аддитивных шумовых помех (ШП) для более точного решения задач спектрального оценивания эффективны предлагаемые подходы, основанные на оптимизации статистических моделей кусочно-стационарных радиотехнических сигналов, построении алгоритмов параметрического спектрального анализа с учетом степени влияния мешающих процессов на оценку автокорреляционных свойств составного процесса.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам развития методов оценивания спектров радиотехнических сигналов и моделирования случайных процессов на фоне флуктуирующих помех посвящены научные работы многих научных коллективов и ученых, таких как С.Л. Марпл-мл., А.Н. Колмогоров, Д. Джонсон, Д. Миддлтон, Г. Дженкинс и Д. Ваттс, Г.Л. Ван Трис, А.Г. Горелик, С.Ф. Коломиец, В.А. Ковригин, В.В. Витязев, П.А. Бакулев, В.В. Чапурский, В.И. Тихонов, С.Н. Кириллов, В.И. Кошелев, В.Г. Андреев, А.Г. Тартаковский, А.А. Федотов и др.

Целью диссертационной работы является построение и оптимизация алгоритмов спектрального анализа кусочно-стационарных радиотехнических сигналов при воздействии нестационарных по мощности аддитивных шумовых помех.

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

1. Разработать методику оптимизации математического описания

кусочно-стационарных радиотехнических сигналов.

2. Разработать модифицированный метод спектрального анализа радиотехнических процессов на фоне аддитивных кусочно-стационарных помех для уменьшения их влияния в условиях изменения мощности мешающих воздействий в процессе наблюдения.

3. Модифицировать адаптивный алгоритм параметрического спектрального анализа кусочно-стационарных радиотехнических сигналов с учетом влияния изменяющейся мощности аддитивного шума на оцениваемые корреляционные свойства.

4. Разработать новые программные средства, реализующие предложенные алгоритмы, для их применения в современных научных и технических областях, связанных с обработкой радиотехнических сигналов.

Методы проведения исследования. В диссертационной работе используются методы, основанные на параметрическом спектральном оценивании случайных процессов, математическом анализе и статистическом описании временных рядов, статистической теории радиотехнических систем, матричного исчисления, непараметрического спектрального анализа сигналов, методы поиска экстремума целевых функций.

Научная новизна диссертации заключается в следующем.

1. Разработана методика оптимизации математического описания кусочно-стационарных радиотехнических сигналов, которая дает возможность повысить эффективность спектрального оценивания при воздействии аддитивных нестационарных по мощности шумовых помех.

2. Предложен модифицированный метод спектрального анализа радиотехнических процессов, наблюдаемых на фоне аддитивных кусочно-стационарных шумов, изменяющих свою мощность во время наблюдения, для повышения вычислительной эффективности алгоритмов параметрического спектрального оценивания.

3. Разработан модифицированный адаптивный алгоритм спектрального анализа кусочно-стационарных процессов с учетом влияния изменяющейся мощности аддитивного шума на автокорреляционные свойства составного процесса, дающий возможность повысить точность спектрального оценивания радиотехнических сигналов на фоне кусочно-стационарных помех.

4. Разработаны оригинальные программные средства, реализующие предложенные алгоритмы, для их применения в современных научных и технических областях, сопряженных с проблематикой цифрового спектрального анализа радиотехнических сигналов.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждаются: корректным использованием математического аппарата; натурными и полунатурными экспериментами; совпадением результатов диссертационной работы в частных случаях с известными из научно-технической литературы данными; практическим использованием результатов диссертации в различных организациях для решения задач спектрального оценивания в нескольких областях.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Методика оптимизации математического описания кусочно-стационарных радиотехнических сигналов обеспечивает уменьшение в 5...7 раз невязки между контрольным и оцениваемым спектрами по сравнению с обычным методом авторегрессии для спектрального оценивания за счёт использования априорной информации о меняющейся во времени мощности мешающего процесса.

2. Модифицированный метод спектрального анализа радиотехнических сигналов при их наблюдении на фоне аддитивных кусочно-стационарных помех даёт возможность учесть искаженные шумами фрагменты кусочно-стационарного случайного процесса для уменьшения влияния нестационарных помех и сократить порядок p модели в 2...2,5 раза при сохранении той же эффективности спектральной оценки, которая достигается обычным авторегрессионным методом.

3. Модифицированный адаптивный алгоритм спектрального анализа кусочно-стационарных процессов с коррекцией оценок корреляционных матриц для учёта влияния изменяющейся мощности аддитивного шума даёт возможность уменьшить в 3...9 раз невязку между контрольным и оцениваемым спектрами по сравнению с обычным методом авторегрессии.

Внедрение научных результатов осуществлено в учебный процесс ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина», а также в научно-технические разработки компании ООО «ИНТЕРСТАР ПРОЕКТ», о чём получены соответствующие акты внедрения.

Апробация работы произведена в форме научных докладов по основным результатам диссертационной работы и дискуссий, которые проходили на следующих научно-технических и научно-практических конференциях: III, VI Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании» (СТНО-2020, 2023) (г. Рязань, март 2020, 2023); XXXIII — XXXV Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы» (Биомедсистемы-

2020 — 2022) (г. Рязань, декабрь 2020 — 2022); II Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные вопросы радиотехники и электроники», (г. Тула, апрель 2022); VII Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки и производства» (г. Рязань, ноябрь 2022); XXVII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (г. Рязань, декабрь 2022).

Публикации. По теме диссертации опубликована 21 печатная научная работа, в том числе 4 статьи в изданиях, входящих в список ВАК, 12 тезисов докладов на научно-технических конференциях, в том числе 8 тезисов на конференциях международного и всероссийского уровня, получено 5 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ, реализующих предложенные алгоритмы.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, библиографического списка из 126 наименований и 3-х приложений. Диссертация содержит 130 страниц, в том числе 96 страниц основного текста, 15 таблиц и 10 рисунков.

Содержание диссертации

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационных исследований, приводится краткий анализ основных проблем в области спектрального анализа случайных радиотехнических сигналов для повышения эффективности их спектрального оценивания, формулируются цели и задачи исследований, излагаются основные положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна и практическая ценность диссертационной работы, приведены её структура и принципы условных математических обозначений.

В первой главе излагается методика оптимизации математического описания кусочно-стационарных радиотехнических сигналов. Эффективность оптимизации оценивалась по критерию минимума квадрата длины E_ε вектора ε , невязки между контрольным и модельным спектрами.

Представим серию \mathbf{X} из T наблюдений X_t в виде дискретной последовательности $\mathbf{X}=[X_0, X_1, \dots, X_t, \dots, X_{T-1}]^T$ (T — знак транспонирования), представляющей собой реализацию кусочно-стационарного случайного процесса:

$$X_t = \begin{cases} X_t^{(1)}, & 0 \leq t < \theta, \\ X_t^{(2)}, & \theta \leq t \leq T-1, \end{cases} \quad \text{или} \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}^{(1)} \\ \text{---} \\ \mathbf{X}^{(2)} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где θ — заранее неизвестный, подлежащий оцениванию момент «разладки» — скачкообразного изменения параметров мешающих воздействий; T — общее число временных отсчётов; $\mathbf{X}^{(1)} = [X_0^{(1)}, X_1^{(1)}, \dots, X_m^{(1)}, \dots, X_{\theta-1}^{(1)}]^T$, $m=0, 1, \dots, \theta-1$; $\mathbf{X}^{(2)} = [X_\theta^{(2)}, X_1^{(2)}, \dots, X_n^{(2)}, \dots, X_{T-1}^{(2)}]^T$, $n=\theta, \theta+1, \dots, T-1$ — реализации двух различных по своим статистическим свойствам процессов (например, с аддитивными некоррелированными шумами с нулевым средним и со среднеквадратическими отклонениями σ_1 и σ_2 соответственно). В дальнейшем полагается, что $\sigma_2 > \sigma_1$.

Для эффективного описания информативных признаков процессов необходимо создать адекватную математическую модель обрабатываемых сигналов. В условиях воздействия нестационарных ШП в данной работе для более точного решения задачи спектрального оценивания предлагается модель $\tilde{\mathbf{X}}$ процесса \mathbf{X} . При этом вектор $\tilde{\mathbf{X}} = [\tilde{X}_0, \tilde{X}_1, \dots, \tilde{X}_t, \dots, \tilde{X}_{T-1}]^T$ временных отсчётов \tilde{X}_t предлагаемой модели имеет вид:

$$\tilde{\mathbf{X}} = \mathbf{W}\mathbf{X}, \quad (2)$$

где $\mathbf{W} = \text{diag}(\mathbf{w})$ — $(T \times T)$ -мерная диагональная матрица с элементами w_m , w_n вектора \mathbf{w} весовых коэффициентов на главной диагонали, $\mathbf{w}^T = [w_0, w_1, \dots, w_m, \dots, w_{\theta-1}; w_\theta, w_{\theta+1}, \dots, w_n, \dots, w_{T-1}]$; $m=0, 1, \dots, \theta-1$; $n=\theta, \theta+1, \dots, T-1$; w_m — неизменные весовые коэффициенты, например $w_m=1$; w_n — изменяемые (оптимизируемые) неотрицательные весовые коэффициенты, $w_n > 0$.

Как показали эксперименты, данный подход к созданию модели $\tilde{\mathbf{X}}$ процесса \mathbf{X} эффективен в различных прикладных областях (лазерные системы зондирования, локация, астрономия, медицинская и техническая диагностика), если существует необходимость проведения спектрального анализа процесса на фоне нестационарных по мощности аддитивных шумов.

Важной задачей при синтезе модифицированного процесса $\tilde{\mathbf{X}}$ является выбор весовых функций, т.е. компонентов w_m , w_n вектора \mathbf{w} . Как показали эксперименты, проведённые на массивах цифровых данных, полученных из разных прикладных областей, весовые компоненты w_m и w_n вектора \mathbf{w} могут быть сформированы по следующему правилу:

$$w_m=1, w_n = \frac{\max(\mathbf{X}^{(1)})}{\max[-\min(\mathbf{X}^{(2)}), \max(\mathbf{X}^{(2)})]}, \quad (3)$$

где $\max(\bullet)$ — оператор, определяющий максимальное значение коэффициентов вектора; $\min(\bullet)$ — оператор, определяющий минимальное

значение коэффициентов вектора.

Среди различных возможных критериев оценки для оптимизации предлагаемой модели $\tilde{\mathbf{X}}$ использован критерий минимума квадрата длины E L -мерного вектора $\boldsymbol{\varepsilon}$ невязки:

$$E = \boldsymbol{\varepsilon}^H \boldsymbol{\varepsilon} / L, \quad (4)$$

где L — число спектральных отсчётов ($L \geq T$); H — знак эрмитового сопряжения (транспонирования и комплексного сопряжения); $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{c} - \mathbf{s}$, где \mathbf{s} — спектральные характеристики модели; \mathbf{c} — спектр, полученный по последовательности $\mathbf{X}^{(1)}$ и подвергнутой низкочастотной фильтрации последовательности $\mathbf{X}^{(2)}$:

$$\mathbf{c} = \mathbf{F} \begin{bmatrix} \mathbf{X}^{(1)} \\ \overline{\overline{\overline{\mathbf{X}}_{\Phi}^{(2)}}} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $\mathbf{X}_{\Phi}^{(2)}$ — подвергнутая низкочастотной фильтрации зашумлённая часть $\mathbf{X}^{(2)}$ последовательности \mathbf{X} ; компоненты $F_{l,k}$ матрицы $\mathbf{F} = [F_{l,k}]$ дискретного прямого преобразования Фурье рассчитываются из соотношения:

$$F_{l,k} = \exp(-i2\pi kl/L); \quad k=0, 1, \dots, T-1; \quad l=0, 1, \dots, L-1;$$

где i — мнимая единица; l — текущий частотный отсчёт; k — текущий временной отсчёт.

Комплексный частотный спектр \mathbf{s} получается в результате перемножения вектора $\tilde{\mathbf{X}}$ модели с матрицей \mathbf{F} комплексного дискретного преобразования Фурье:

$$\mathbf{s} = \mathbf{F}\tilde{\mathbf{X}} = \mathbf{F}\mathbf{W}\mathbf{X}. \quad (6)$$

С учётом введённых в (5), (6) обозначений выражение (4) для целевой функции может быть представлено в следующем виде:

$$E(\mathbf{X}) = (\mathbf{c} - \mathbf{F}\mathbf{W}\mathbf{X})^H (\mathbf{c} - \mathbf{F}\mathbf{W}\mathbf{X}) / L \rightarrow \min_{\mathbf{X} \in C^L}, \quad (7)$$

где C^L — комплексное L -мерное пространство.

В случае заданного вектора \mathbf{w} весов w_i значимости и экспериментально найденного вектора \mathbf{s} отсчётов мгновенного комплексного спектра последовательности \mathbf{X} , зашумленный фрагмент $\mathbf{X}^{(2)}$ которой подвергнут низкочастотной фильтрации с целью уменьшения влияния аддитивного шума, критерий (7) используется для нахождения оптимального значения $\mathbf{X}_{\text{опт}}$ вектора \mathbf{X} отсчётов X_i исходной последовательности.

Возьмем первую производную по комплексному вектору \mathbf{X} и приравняем её к T -мерному нулевому вектору-столбцу $\mathbf{0}$:

$$dE(\mathbf{X})/d\mathbf{X}^H = L^{-1}d[(\mathbf{c}-\mathbf{F}\mathbf{W}\mathbf{X})^H(\mathbf{c}-\mathbf{F}\mathbf{W}\mathbf{X})]/d\mathbf{X}^H = \mathbf{0},$$

$$-\mathbf{W}^H\mathbf{F}^H\mathbf{c} + \mathbf{W}^H\mathbf{F}^H\mathbf{F}\mathbf{W}\mathbf{X}_{\text{опт}} = \mathbf{0}. \quad (8)$$

Тогда оптимальный вектор $\mathbf{X}_{\text{опт}}$ вектора \mathbf{X} приобретает следующий вид:

$$\mathbf{X}_{\text{опт}} = (\mathbf{W}^H\mathbf{F}^H\mathbf{F}\mathbf{W})^{-1}\mathbf{W}^H\mathbf{F}^H\mathbf{c}. \quad (9)$$

С целью объективной оценки эффективности предлагаемой методики введём критерий нормированного квадрата длины E_s вектора $\boldsymbol{\varepsilon}_s$ невязки между векторами $\tilde{\mathbf{c}}, \tilde{\mathbf{s}}$ спектральных отсчетов для оценки качества спектрального оценивания сигналов на фоне аддитивных нестационарных по мощности шумовых помех:

$$E_s = \boldsymbol{\varepsilon}_s^T \boldsymbol{\varepsilon}_s / L, \text{ где } \boldsymbol{\varepsilon}_s = \tilde{\mathbf{c}} - \tilde{\mathbf{s}}, \quad (10)$$

где $\tilde{\mathbf{c}}$ — L -мерный вектор спектральной плотности мощности (СПМ) контрольной модели, в качестве которой использован энергетический спектр, построенный с помощью авторегрессионной (АР) модели большого ($p=20$) порядка по незашумлённому сигналу; $\tilde{\mathbf{s}}$ — L -мерный вектор СПМ, определённый соответствующими (известным и предлагаемым) АР-методами.

В приведённой ниже таблице 1 даны результаты сравнения адекватности спектрального оценивания при использовании различных (предлагаемого и известного) авторегрессионных методов и вариации длины T исходной временной выборки \mathbf{X} .

Таблица 1 – Качество спектрального оценивания

Длина T выборки \mathbf{X} \diagdown АР-модели	Обычная	Предлагаемая
100	0,099	0,019
200	0,083	0,011
300	0,056	$8,236 \cdot 10^{-3}$

При построении зависимостей величины E_s от длины T временной выборки, приведенных в таблице 1, принято: $p=5$, $L=1000$, $\sigma_1=10^{-3}$, $\sigma_2=10^{-0,5}$, $\theta=T/2$. Компьютерные эксперименты, результаты которых сведены в таблицу 1, показали, что в широком диапазоне изменений длины T выборки \mathbf{X} предложенный подход имеет меньшие значения квадрата длины E_s вектора $\boldsymbol{\varepsilon}_s$ невязки и, следовательно, меньшую погрешность спектрального оценивания, чем известный АР-метод. Например, при $T=200$ выигрыши предлагаемого подхода по критерию (10) в оценке спектра достигают 7 раз по сравнению с обычным АР-методом.

Во второй главе диссертации разрабатывается модифицированный метод спектрального анализа процессов при их наблюдении на фоне аддитивных кусочно-стационарных помех. На основе оценки оптимального значения весового коэффициента w_2 предлагаемый метод даёт возможность учесть искаженные шумами фрагменты кусочно-стационарного случайного процесса для уменьшения влияния нестационарных ШП на адекватность спектрального оценивания и повышения точности спектральных оценок. Моделирование и анализ стохастических временных рядов при воздействии нестационарных ШП является актуальным и находит своё применение во многих областях, таких как обработка данных астрономических наблюдений, обработка сигналов систем связи, обработка биомедицинских сигналов, техническая диагностика, дистанционное зондирование и т.д.

Как и было принято выше, серия \mathbf{X} из T наблюдений X_t в виде дискретной последовательности $\mathbf{X}=[X_0, X_1, \dots, X_t, \dots, X_{T-1}]^T$ представляет собой реализацию кусочно-стационарного случайного процесса (1).

Вектор $\tilde{\mathbf{X}}=[\tilde{X}_0, \tilde{X}_1, \dots, \tilde{X}_t, \dots, \tilde{X}_{T-1}]^T$ временных отсчётов \tilde{X}_t предлагаемой модели имеет вид:

$$\tilde{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}^{(1)} \\ \text{---} \\ \mathbf{0}^{(2)} \end{bmatrix} w_1 + \begin{bmatrix} \mathbf{0}^{(1)} \\ \text{---} \\ \mathbf{X}^{(2)} \end{bmatrix} w_2, \quad (11)$$

где $\mathbf{0}^{(1)}$ — θ -мерный нулевой вектор-столбец; $\mathbf{0}^{(2)}$ — $(T-\theta)$ -мерный нулевой вектор-столбец; w_1 — неизменный весовой коэффициент, например $w_1=1$; w_2 — изменяемый (оптимизируемый) в пределах $[0; 1]$ весовой коэффициент, $w_2 \in [0; 1]$.

Для уменьшения деструктивного воздействия нестационарных шумовых помех на анализируемый процесс оценим оптимальное значение w_2 при заданных (известных) весовом коэффициенте w_1 и моменте разладки θ . Оптимизацию произведём по критерию минимума квадрата длины L -мерного вектора $\boldsymbol{\varepsilon}$ невязки:

$$\mathbf{E}=\boldsymbol{\varepsilon}^H\boldsymbol{\varepsilon}, \text{ где } \boldsymbol{\varepsilon}=\mathbf{c}-\mathbf{s}, \quad (12)$$

где \mathbf{c} — спектр, полученный на основе мало зашумлённого θ -мерного фрагмента $\mathbf{X}^{(1)}$ T -мерной последовательности \mathbf{X} , подверженного низкочастотной фильтрации; \mathbf{s} — спектральные характеристики, полученные по последовательности $\tilde{\mathbf{X}}$.

Комплексный частотный спектр \mathbf{s} получается перемножением вектора $\tilde{\mathbf{X}}$ и матрицы \mathbf{F} комплексного дискретного преобразования Фурье:

$$\begin{aligned} \mathbf{s} &= \mathbf{F}\tilde{\mathbf{X}} = \\ &= \mathbf{F} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{X}^{(1)} \\ \text{---} \\ \mathbf{0}^{(2)} \end{bmatrix} w_1 + \begin{bmatrix} \mathbf{0}^{(1)} \\ \text{---} \\ \mathbf{X}^{(2)} \end{bmatrix} w_2 \right) = \mathbf{F} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{X}^{(1)} \\ \text{---} \\ \mathbf{0}^{(2)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}^{(1)} \\ \text{---} \\ \mathbf{X}^{(2)} \end{bmatrix} w_2 \right), \end{aligned} \quad (13)$$

где $w_1=1$, матрица \mathbf{F} прямого преобразования Фурье задана аналогично (5) и имеет L -строк, T -столбцов.

Аналогично вектор \mathbf{c} оптимальных решений получается преобразованием ряда \mathbf{u} матрицей \mathbf{F} :

$$\mathbf{c} = \mathbf{F}\mathbf{u}. \quad (14)$$

Под \mathbf{u} можно подразумевать мало искажённую часть $\mathbf{X}^{(1)}$ процесса \mathbf{X} , подверженного низкочастотной фильтрации, так как предполагается, что $\sigma_1 < \sigma_2$.

При учёте введённых в (13), (14) обозначений выражение (12) для целевой функции может быть представлено в следующем виде:

$$E(w_2) = \left\{ \begin{array}{l} \left[\mathbf{c} - \mathbf{F} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{X}^{(1)} \\ \text{---} \\ \mathbf{0}^{(2)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}^{(1)} \\ \text{---} \\ \mathbf{X}^{(2)} \end{bmatrix} w_2 \right) \right]^H \times \\ \times \left[\mathbf{c} - \mathbf{F} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{X}^{(1)} \\ \text{---} \\ \mathbf{0}^{(2)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}^{(1)} \\ \text{---} \\ \mathbf{X}^{(2)} \end{bmatrix} w_2 \right) \right] \end{array} \right\} \rightarrow \min_{w_2 \in [0;1]}. \quad (15)$$

Для определения оптимального значения w_2 необходимо отыскать глобальный минимум целевой функции (15). Возьмем первую производную по w_2 от функции (15):

$$\begin{aligned} dE(w_2) / dw_2 &= \\ &= d \left\{ \begin{array}{l} \left[\mathbf{c} - \mathbf{F} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{X}^{(1)} \\ \text{---} \\ \mathbf{0}^{(2)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}^{(1)} \\ \text{---} \\ \mathbf{X}^{(2)} \end{bmatrix} w_2 \right) \right]^H \times \\ \times \left[\mathbf{c} - \mathbf{F} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{X}^{(1)} \\ \text{---} \\ \mathbf{0}^{(2)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}^{(1)} \\ \text{---} \\ \mathbf{X}^{(2)} \end{bmatrix} w_2 \right) \right] \end{array} \right\} / dw_2. \end{aligned} \quad (16)$$

Преобразовав и приравняв выражение (16) к нулю, получим оптимальное значение w_2 :

$$w_2 = \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{0}^{(1)} \\ \text{---} \\ \mathbf{X}^{(2)} \end{bmatrix}^H \mathbf{F}^H \mathbf{F} \begin{bmatrix} \mathbf{0}^{(1)} \\ \text{---} \\ \mathbf{X}^{(2)} \end{bmatrix} \right\}^{-1} \times \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{0}^{(1)} \\ \text{---} \\ \mathbf{X}^{(2)} \end{bmatrix}^H \mathbf{F}^H \mathbf{c} - \begin{bmatrix} \mathbf{0}^{(1)} \\ \text{---} \\ \mathbf{X}^{(2)} \end{bmatrix}^H \mathbf{F}^H \mathbf{F} \begin{bmatrix} \mathbf{X}^{(1)} \\ \text{---} \\ \mathbf{0}^{(2)} \end{bmatrix} \right\}. \quad (17)$$

На рисунке 1 приведены результаты оценки СПМ с помощью авторегрессионных параметрических методов при порядке модели $p=4$, числе $T=100$ наблюдений, числе $L=1000$ частотных отсчётов, среднеквадратических отклонениях $\sigma_1=10^{-2}$ и $\sigma_2=1$ шума, моменте разладки $\theta=T/2$.

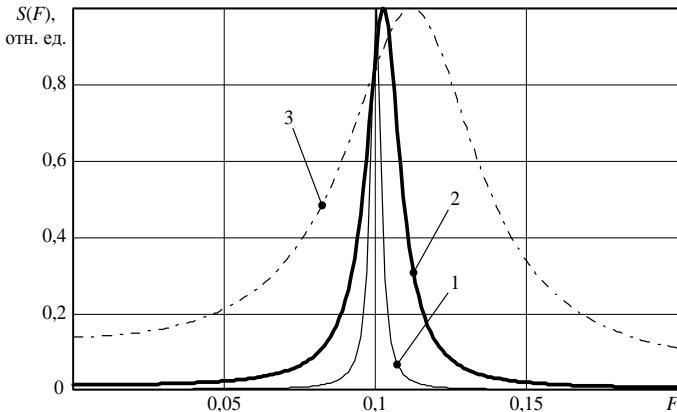


Рисунок 1 – Оценки спектральных плотностей мощности

На рисунке 1 введены следующие условные обозначения: $S(F)$ — нормированная к своему максимальному значению СПМ в относительных единицах; F — относительная частота, численно равная отношению номера l текущего спектрального отсчёта к общему числу L спектральных отсчётов ($F=l/L$); сплошная тонкая кривая 1 — энергетический контрольный спектр, полученный с помощью АР-модели 20-го порядка по исходному незашумлённому сигналу; сплошная жирная кривая 2 — СПМ, полученная на основе предложенного метода с помощью АР-модели ($p=4$); штрихпунктирная линия 3 — СПМ, полученная с использованием простой АР-модели того же порядка $p=4$ по последовательности \mathbf{X} без взвешивания её отсчётов компонентами w_1, w_2

вектора \mathbf{w} .

Из анализа рисунка 1 можно видеть, что качество оценивания СПМ у модифицированной модели лучше, чем традиционным параметрическим АР-методом в условиях воздействия на полезный гармонический сигнал нестационарных по мощности шумовых помех.

Для более наглядной оценки эффективности используется критерий относительных отклонений ΔF оцененных относительных доминантных частот \hat{F} от истинной относительной частоты F гармонического полезного сигнала:

$$\Delta F = \frac{|F - \hat{F}|}{F} \cdot 100 \% . \quad (18)$$

Полученные значения \hat{F} измеренных относительных доминантных частот для предлагаемого метода — $F_{\pi}=0,102$ (см. жирную сплошную линию 2 на рисунке 1), а также полученные для сравнения с предлагаемым методом спектрального анализа значения, оцененные обычным АР-методом — $F_a=0,111$ (см. штрихпунктирную линию 3 на рисунке 1). При величине истинной относительной частоты $F=0,1$ (см. тонкую сплошную линию 1 на рисунке 1) получим, что относительная ошибка ΔF , рассчитанная по выражению (18), составляет для предлагаемого метода $\Delta F_{\pi}=2\%$, а для обычного авторегрессионного метода $\Delta F_a=11\%$ при одинаковых порядках $p=4$ моделей.

Проведенный сравнительный анализ методик спектрального оценивания показал, что величины ΔF существенно (до 5 раз) уменьшаются путём использования предлагаемого метода по сравнению с обычным АР-подходом.

Итоги расчетов зависимости относительного отклонения $\Delta F(p)$ оцененных относительных доминантных частот \hat{F} от истинной относительной частоты F при различных значениях порядка p моделей, $T=200$, $L=1000$, $\sigma_1=10^{-3}$, $\sigma_2=1$, $\theta=T/2$ и $F=0,1$ приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Качество моделирования

АР-модели p	Обычная	Предлагаемая
2	100	6
4	9	1
6	2	0
8	1	0
10	1	0

При проведении сравнительного анализа и сопоставлении эффективности по критерию (18) с обычной (известной) АР-моделью (см.

таблицу 2) снижение порядка p может достигать 2-х раз при сохранении такой же точности спектрального оценивания. Двукратное снижение порядка существенно снижает вычислительные затраты на реализацию алгоритмов спектрального оценивания. Выигрыши в вычислительных затратах при использовании для обращения автокорреляционных матриц при решении уравнения Юла – Уолкера быстрых рекуррентных процедур Левинсона – Дербина достигают 4-х раз при снижении порядка p с 4-го до 2-го, а при использовании для обращения метода исключения Гаусса выигрыши составляют величину до 8 раз.

В третьей главе предлагается и исследуется модифицированный метод спектрального анализа кусочно-стационарных процессов для учёта влияния изменяющейся мощности аддитивного шума на корреляционные матрицы составного процесса. Решается задача анализа нестационарных сигналов с изменяющимися во времени параметрами, что приводит к необходимости коррекции методик АР-оценок спектра и АР-моделей, например при анализе речи из-за изменения параметров голосового тракта, а также при медицинской диагностике в силу вариаций показателей человеческого организма во время наблюдения, в частности при холтеровском мониторинге. На основе оценивания оптимального значения корректирующей величины мощности P_n шума и весового коэффициента β можно внести изменения в коэффициенты автокорреляции составного процесса и частично преодолеть деструктивное воздействие нестационарных шумовых помех на автокорреляционные свойства анализируемого радиотехнического сигнала для повышения качества его спектрального оценивания.

Как и было принято ранее, предположим, что во фрагменте $\mathbf{X}^{(1)}$ воздействия шумов невелики ($\sigma_1 < \sigma_2$), а статистические свойства $\mathbf{X}^{(1)}$ характеризуются матрицей автокорреляции \mathbf{R}_1 ; последовательность $\mathbf{X}^{(2)}$ наблюдений сильно зашумлена и имеет автокорреляционную матрицу \mathbf{R}_2 . Отметим, что матрицы $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2$ являются эрмитовыми и теплицевыми.

Для уменьшения деструктивного воздействия нестационарных шумовых помех на автокорреляционные свойства составного процесса оценим оптимальные значения P_n и β при заданном (известном) моменте разладки θ . Оптимизацию произведём по критерию минимума квадрата длины $E(p+1)$ -мерного вектора $\boldsymbol{\varepsilon}$ невязки:

$$E = \boldsymbol{\varepsilon}^H \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (19)$$

Оптимизационная функция значения P_n имеет вид:

$$E(P_n) = [\mathbf{R}_1 \mathbf{i} - (\mathbf{R}_2 - P_n \mathbf{I}) \mathbf{i}]^H [\mathbf{R}_1 \mathbf{i} - (\mathbf{R}_2 - P_n \mathbf{I}) \mathbf{i}] \rightarrow \min_{P_n > 0}, \quad (20)$$

где P_n — корректирующая величина, основанная на оценке мощности

аддитивного шума; \mathbf{I} — $(p+1) \times (p+1)$ -мерная единичная матрица; \mathbf{i} — $(p+1)$ -мерный крайний левый вектор-столбец единичной матрицы \mathbf{I} .

Оптимизационная функция значения β примет следующий вид:

$$E(\beta) = \{\mathbf{R}\mathbf{i} - [\beta\mathbf{R}_1 + (1-\beta)\mathbf{R}_2]\mathbf{i}\}^H \{\mathbf{R}\mathbf{i} - [\beta\mathbf{R}_1 + (1-\beta)\mathbf{R}_2]\mathbf{i}\} \rightarrow \min_{\beta>0}, \quad (21)$$

где \mathbf{R} — $(p+1) \times (p+1)$ -мерная автокорреляционная квадратная матрица последовательности соединения между малозашумлённым фрагментом $\mathbf{X}^{(1)}$ и низкочастотным отфильтрованным; β — весовой коэффициент, определяющий доли β и $(1-\beta)$ процессов с различными статистическими свойствами, т.е. в данном случае с разными шумовыми компонентами.

С целью получения оптимальных значений P_n и β необходимо отыскать глобальный минимум целевых функций (20) и (21). После выполнения математических преобразований получим оптимальное значение P_n :

$$P_n = (\mathbf{R}_2\mathbf{i})^H \mathbf{i} - (\mathbf{R}_1\mathbf{i})^H \mathbf{i}. \quad (22)$$

Оптимальное значение β примет следующий вид:

$$\beta = [(\mathbf{R}_2\mathbf{i} - \mathbf{R}_1\mathbf{i})^H (\mathbf{R}_2\mathbf{i} - \mathbf{R}_1\mathbf{i})] [(\mathbf{R}_2\mathbf{i} - \mathbf{R}_1\mathbf{i})^H (\mathbf{R}_2\mathbf{i} - \mathbf{R}_1\mathbf{i})]^{-1}. \quad (23)$$

Найденные значения P_n и β в выражениях (22) и (23) позволяют скорректировать методику АР-оценок спектра и АР-модель, повысив тем самым точность спектрального параметрического оценивания радиотехнических сигналов на фоне аддитивных кусочно-стационарных помех.

Спектральные оценки $S(F)$, представляющие собой нормированные к своим максимальным значениям СПМ в относительных единицах, определённых с использованием авторегрессионных параметрических методов при $p=7$, $T=500$, $L=1000$, $\theta=T/2$, $\sigma_1=0,2$ и $\sigma_2=1$, показаны на рисунке 2, причём сплошная тонкая кривая 1 — контрольный спектр, построенный с помощью АР-модели 20-го порядка по исходному незашумлённому сигналу; сплошная жирная кривая 2 — спектр, определённый предложенным методом, построенный с помощью АР-модели ($p=7$); пунктирная линия 3 — спектр, построенный с использованием усечённой АР-модели (при $p=7$), полученной только по незашумлённой части $\mathbf{X}^{(1)}$ при отбрасывании зашумлённой части $\mathbf{X}^{(2)}$ последовательности \mathbf{X} ; штрихпунктирная линия 4 — спектр, построенный с помощью обычной АР-модели того же порядка $p=7$, полученной по всей последовательности \mathbf{X} без учёта весового коэффициента β .

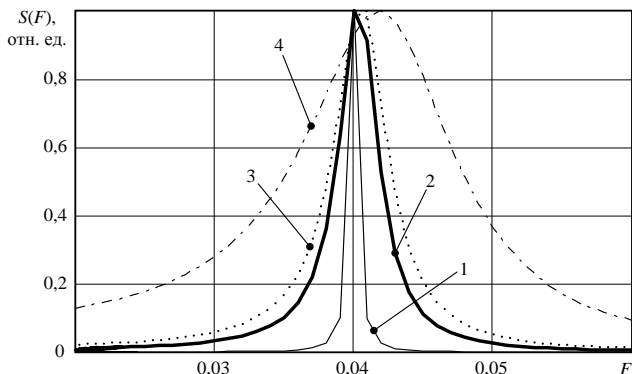


Рисунок 2 – Оценки спектральных характеристик

Рассматривая рисунок 2, можно сделать заключение, что модифицированная модель имеет более высокое качество (острый пик) спектрального оценивания, чем обычный и усечённый параметрический АР-метод в условиях воздействия на полезный гармонический сигнал нестационарных по мощности шумовых помех. Кроме того, при расчёте выигрыша методов спектрального параметрического авторегрессионного анализа на основе использования критерия (10) в случае $p=10$ предложенный подход имеет выигрыш в 1,6 раза по сравнению с методом усечения и до 5,5 раза по сравнению с обычным АР-методом.

В заключении подведены итоги диссертационной работы и сформулированы её основные научные и практические результаты.

1. Разработана методика оптимизации математического описания кусочно-стационарных радиотехнических сигналов, которая уменьшает в 5...7 раз невязку между контрольным и оцениваемым спектрами по сравнению с обычным методом авторегрессии для спектрального оценивания за счёт использования априорной информации о меняющейся во времени мощности мешающего процесса.

2. Разработан метод спектрального анализа процессов при их наблюдении на фоне аддитивных кусочно-стационарных помех, который даёт возможность учесть искаженные шумами фрагменты кусочно-стационарного случайного процесса для уменьшения влияния нестационарных помех. При проведении сравнительного анализа с обычной авторегрессионной моделью снижение порядка модели может достигать 2...2,5 раза при сохранении той же точности спектрального оценивания.

3. Разработан модифицированный адаптивный алгоритм спектрального анализа кусочно-стационарных процессов с учетом влияния изменяющейся мощности аддитивного шума на корреляционные свой-

ства, который даёт возможность уменьшить в 3...9 раз невязку между контрольным и оцениваемым спектрами по сравнению с обычным методом авторегрессии. Выигрыши достигаются за счёт учёта факта резкого изменения мощности аддитивного шума при наблюдении радиотехнического процесса, выборки которого подвергаются спектральному анализу.

В приложениях приведены списки условных обозначений, сокращений и аббревиатур, терминов, встречающихся в тексте диссертации, копии актов о внедрении результатов, а также свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, полученные в процессе работы над диссертацией.

Список основных научных работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. Андреев В.Г., Чан В.А. Оптимизация статистических моделей кусочно-стационарных радиотехнических сигналов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. Выпуск 80. Рязань: РГРТУ, 2022. С. 3-11.

2. Андреев В.Г., Чан В.А. Параметрический спектральный анализ кусочно-стационарных радиотехнических сигналов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. Выпуск 81. Рязань: РГРТУ, 2022. С. 3-11.

3. Андреев В.Г., Чан В.А. Параметрический спектральный анализ кусочно-стационарных радиотехнических сигналов с изменяющимися корреляционными свойствами // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. Выпуск 83. Рязань: РГРТУ, 2023. С. 3-12.

4. Андреев В.Г., Чан В.А. Параметрический спектральный анализ кусочно-стационарных радиотехнических сигналов с учетом воздействия шума на корреляционные свойства // Цифровая обработка сигналов. 2023. № 1. С. 22-26.

Материалы международных и всероссийских конференций

5. Чан В.А., Андреев В.Г. Алгоритмы спектрального анализа радиосигналов на фоне кусочно-стационарных помех // Современные технологии в науке и образовании «СТНО – 2020»: труды III Междунар. науч.-техн. форума. Рязань: РГРТУ, 2020. С. 99-103.

6. Чан В.А., Андреев В.Г. Подавление кусочно-стационарных помех в сигналах медицинской диагностики // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы «Биомедсистемы – 2020»: материалы XXXIII Всерос. науч.-техн. конф. Рязань: РГРТУ, 2020. С. 257-260.

7. Чан В.А., Андреев В.Г. Повышение точности спектрального оценивания сигналов медицинской диагностики // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы «Биомедсистемы – 2021»: материалы XXXIV Всерос. науч.-техн. конф. Рязань: РГРТУ, 2021. С. 162-165.

8. Чан В.А., Андреев В.Г. Алгоритм спектрального анализа кусочно-стационарных сигналов световых отражений // II Всерос. науч.-техн. конф. «Актуальные вопросы радиотехники и электроники». Тула: ТулГУ, 2022. С. 62-66.

9. Чан В.А. Адаптивный алгоритм спектрального анализа кусочно-стационарных радиосигналов систем связи // XXVII Всерос. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (НИТ-2022). Рязань: РГРТУ, 2022. С. 184-185.

10. Чан В.А., Андреев В.Г. Алгоритм спектрального анализа кусочно-стационарных сигналов световых отражений // VII Всерос. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы современной науки и производства». Рязань: РГРТУ, 2022. С. 149-156.

11. Чан В.А., Андреев В.Г. Спектральное оценивание кусочно-стационарных сигналов медицинской диагностики // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы «Биомедсистемы – 2022»: материалы XXXV Всерос. науч.-техн. конф. Рязань: РГРТУ, 2022. С. 448-451.

12. Андреев В.Г., Чан В.А. Повышение точности спектрального оценивания кусочно-стационарных радиосигналов световых отражений от искусственных спутников земли // Современные технологии в науке и образовании «СТНО – 2023»: труды VI Междунар. науч.-техн. форума. Рязань: РГРТУ, 2023. Т. 1. С. 79-83.

Прочие публикации

13. Чан В.А. Алгоритмы обработки сигналов на фоне кусочно-стационарных помех для подавления полезного сигнала // Сборник статей Электронного периодического научного журнала «SCI-ARTICLE.RU», 2020. № 86. Режим доступа: <https://sci-article.ru/stat.php?i=1601396872>.

14. Чан В.А., Андреев В.Г. Алгоритм спектральных оценок радиосигналов на фоне кусочно-стационарных помех // Труды VIII МНТК РГРТУ. Рязань: РГРТУ, 2022. С. 29. 282 с.

15. Чан В.А., Андреев В.Г. Цифровой спектральный анализ световых отражений от низкоорбитальных космических объектов // Труды IX МНТК РГРТУ. Рязань: РГРТУ, 2023. С. 39-40. 390 с.

16. Чан В.А. Алгоритм спектрального анализа сигналов лидарных

отражений на фоне кусочно-стационарных помех // Информационные технологии: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГРТУ, 2022. С. 372-375.

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ

17. Андреев В.Г., Чан В.А. Программа для вычисления спектральных оценок при оптимизации статистических моделей кусочно-стационарных радиотехнических сигналов // Свидетельство РФ № 2022618761 о гос. регистрации программ для ЭВМ / ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина». М.: ФСИС, 2022.

18. Андреев В.Г., Чан В.А. Программа для вычисления спектральных оценок радиотехнических сигналов на фоне аддитивных кусочно-стационарных помех // Свидетельство РФ № 2022660608 о гос. регистрации программ для ЭВМ / ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина». М.: ФСИС, 2022.

19. Андреев В.Г., Чан В.А. Программа для вычисления оценки спектральной плотности мощности при восстановлении параметров модели кусочно-стационарных радиотехнических сигналов // Свидетельство РФ № 2022660609 о гос. регистрации программ для ЭВМ / ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина». М.: ФСИС, 2022.

20. Андреев В.Г., Чан В.А. Программа для вычисления спектральных оценок кусочно-стационарных радиотехнических сигналов с учетом воздействия шума на корреляционные свойства // Свидетельство РФ № 2022682746 о гос. регистрации программ для ЭВМ / ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина». М.: ФСИС, 2022.

21. Андреев В.Г., Чан В.А. Программа для вычисления оценки спектральной плотности мощности кусочно-стационарных радиотехнических сигналов с изменяющимися корреляционными свойствами // Свидетельство РФ № 2022683639 о гос. регистрации программ для ЭВМ / ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина». М.: ФСИС, 2022.

Соискатель



В.А. Чан

Ч а н В а н А н ь

АЛГОРИТМЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА
РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ
НА ФОНЕ КУСОЧНО-СТАЦИОНАРНЫХ ПОМЕХ

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 23.06.23. Формат бумаги 60×84 1/16.

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

Тираж 100 экз.

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

Редакционно-издательский центр РГРТУ.