

На правах рукописи



А Н Д Р Е Е В ВЛАДИМИР ГРИГОРЬЕВИЧ

**ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ И УСТРОЙСТВ
ОБРАБОТКИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ
НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ**

05.12.04 — Радиотехника, в том числе системы
и устройства телевидения

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание учёной степени
док т о р а технических наук

Рязань — 2013

Работа выполнена на кафедре радиотехнических систем
ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный
радиотехнический университет».

- Научный консультант д-р техн. наук, профессор
Кошелев Виталий Иванович.
- Официальные оппоненты: Чапурский Валерий Викторович
— д-р техн. наук, старший научный сотрудник,
главный научный сотрудник НИИ радио-
электронной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана;
Костров Виктор Васильевич
— д-р техн. наук, профессор, профессор ка-
федры Радиотехники Муромского института
(филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский госу-
дарственный университет им. Столетовых»;
Клочко Владимир Константинович
— д-р техн. наук, профессор, заведующий
кафедрой Эконометрики и математического
моделирования ФГБОУ ВПО «Рязанский го-
сударственный радиотехнический универси-
тет».
- Ведущая организация ОАО «Корпорация «Фазотрон–НИИР»
(Обособленное подразделение НИИ «Рассвет»).

Защита состоится «26» декабря 2013 года в 12 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.211.04 в ФГБОУ ВПО «Рязанский го-
сударственный радиотехнический университет» по адресу: 390005,
г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке
ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический универ-
ситет».

Автореферат разослан « ____ » _____ 2013 года.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью
организации, просим направлять по адресу: 390005, Рязань, ул. Гагари-
на, 59/1, ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический
университет».

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



Г.В. Овечкин

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования состоит в необходимости повышения качественных показателей систем обработки радиотехнических сигналов путём учёта априорной плохо формализуемой информации о них при построении параметрических моделей авторегрессионскользящего среднего, на базе которых стоятся алгоритмы и устройства первичной обработки квазистационарных сигналов. Современные высокоэффективные методы цифрового спектрального анализа и моделирования случайных процессов основаны на трудах отечественных и зарубежных ученых: Р.Б. Блэкмана, Дж. В. Тьюки, Г. Дженкинса, Д. Ваттса, Ф. Дж. Хэрриса, А. Шустера, М.С. Барлетта, М.Г. Кендалла, П. Дж. Даньелла, Дж. Берга, Дж. Картера, Р. Беллмана, Г. Эмилиани, Д. Кайзера, Р. Хэмминга, С.Л. Марпла-мл., С.М. Кея, Э.А. Робинсона и др. Большой вклад внесли русские ученые: А.М. Трахтман, Л.М. Гольденберг, В.И. Тихонов, В.В. Быков, Л.П. Ярославский, А.А. Ланнэ, П.А. Бакулев, Ю.Г. Сосулин, В.Ф. Писаренко, В.В. Чапурский, Ю.М. Коршунов, В.В. Витязев, В.А. Лихарев, М.Б. Свездлик, Ю.А. Брюханов, В.В. Костров, В.А. Зверев и др.

Развитие теории статистической радиотехники, методов синтеза алгоритмов моделирования и обработки радиотехнических сигналов дали возможность создать высокоэффективные радиотехнические системы и устройства, реализующие близкую к потенциальной эффективность обработки радиосигналов. Выявлена важность использования априорной информации об их свойствах, и разработаны методики её учёта при синтезе радиосистем. Однако данные методики не ориентированы на учёт обобщённых спектрально-корреляционных свойств моделируемых и обрабатываемых процессов, ввиду того, что эти свойства часто выражены в плохо формализуемом виде. Например, на практике, исходя из физических характеристик источника радиотехнического сигнала, зачастую можно качественно определить спектральные свойства электрического колебания: количество его гармонических компонент, форму и ширину спектральных мод, наличие провалов в спектральной плотности мощности или её выраженную узкополосность и т.д. Однако проблема состоит в том, что точные параметры процессов априорно неизвестны, а существует лишь обобщённое неформальное описание спектральных портретов. Обычно этим описанием пренебрегают и считают, что форма спектра априорно неизвестна. Подобный подход, как показано в диссертации, приводит к существенному недоиспользованию потенциальных возможностей моделирования и обработки радиотехнических сигналов и, как следствие, к потерям в эффективности функционирования радиотехнических систем в

целом ряде практических приложений: технической и медицинской диагностике, свето-, тепло- и радиолокации, астрономии, энергетике и пр. Как правило, в перечисленных приложениях имеется информация об общем характере порождаемых физическими объектами процессов, ввиду того, что сами объекты имеют известную структуру и свойства источников радиотехнических сигналов. Это позволяет сделать обоснованные предположения о форме сигналов, их периодичности, частотном диапазоне и т.д. Кроме того, на практике часто важно подробно знать лишь определённые участки спектра процесса, а за пределами интересующих спектральных диапазонов можно ограничиться лишь грубой оценкой спектрального портрета. Далее рассматриваются возможности повышения эффективности функционирования радиотехнических систем путём учета перечисленных плохо формализуемых данных о характере обрабатываемых и моделируемых сигналов.

Объект исследования: радиотехнические системы, осуществляющие приём и обработку сигналов в условиях частичной априорной определённости их спектральных характеристик.

Цель исследования: повышение точности и разрешающей способности радиотехнических систем и устройств в условиях неполной априорной определённости спектральных свойств обрабатываемых сигналов.

Для достижения цели исследования необходимо решить следующие **задачи исследований**.

1. Разработать методику описания исходных временных последовательностей, учитывающую априорную информацию о приоритетных спектральных диапазонах, в которых необходимо обеспечивать высокую адекватность представления частотных свойств, и тех участках спектра, где допустимо грубое спектральное описание. Использование этой методики позволит сократить длину анализируемых временных последовательностей за счёт перераспределения ресурсов моделей экспериментальных процессов.

2. Синтезировать алгоритм построения линейно-ограниченных авторегрессионных моделей, позволяющий повысить адекватность описания спектральных характеристик узкополосных радиотехнических сигналов путём сочетания спектрального и корреляционного подходов к синтезу параметрических моделей в условиях жестких ограничений на длину экспериментальной выборки.

3. Синтезировать алгоритм построения параметрических моделей радиотехнических сигналов, учитывающий параметры систем первичной обработки для сокращения порядка моделирующих фильтров, при обеспечении заданной адекватности моделей по одному из критериев

качества функционирования моделируемой системы: коэффициенту улучшения сигнал-помеха-шум, коэффициенту подавления помехи и т.п.

4. Разработать метод оптимизации авторегрессионных моделей радиотехнических сигналов с унимодальным спектром, дающий возможность исключить процедуру перемножения прямоугольных корреляционных матриц моделируемого процесса в переопределенной системе линейных уравнений Юла-Уолкера при сохранении требуемой адекватности моделирования.

5. Получить аналитические выражения и алгоритмы расчёта матричных коэффициентов векторной переопределенной авторегрессионной модели для описания набора статистически связанных процессов с выходов различных датчиков или каналов радиотехнической системы.

6. Разработать способ обнаружения радиосигналов с доминирующей спектральной модой, основанный на априорной информации о её частотном диапазоне и форме спектральной плотности мощности.

7. Создать методику моделирования радиоотражений от поверхностей со сложной топологией, учитывающую априорные данные о ней и отражающие свойства фрагментов, из которых состоит поверхность.

Методы исследований, использованные в диссертационной работе, основаны на статистической теории радиотехнических систем, параметрическом моделировании случайных процессов, численных методах поиска экстремума целевой функции комплексных переменных, а также дифференциальном и интегральном исчислении таких функций. Основные числовые результаты получены на основе экспериментальных исследований, статистического моделирования и аналитических расчетов, основанных на методах линейной алгебры, поиске экстремумов целевых функций нескольких комплексных переменных и собственных значений комплексных матриц.

Научное и практическое значение полученных результатов состоит в совершенствовании методов синтеза линейных параметрических моделей радиотехнических сигналов для снижения объемов информации, характеризующей их с заданной точностью, а также в улучшении разрешающей способности и помехозащищённости радиотехнических систем. Повышение их эффективности достигается путём использования предлагаемых методов учёта априорной информации о характере спектрально-временных портретов радиотехнических сигналов.

Достоверность научных положений работы, основных её результатов и выводов определяется корректным использованием математического аппарата, физически обоснованных моделей радиотехнических

сигналов и подтверждается совпадением в частных случаях полученных данных с известными, а также близостью результатов натуральных и полунатурных экспериментов, имитационного моделирования и теоретических расчётов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Методика описания исходных временных экспериментальных последовательностей, которая состоит в синтезе коротких модельных временных рядов, сохраняющих на заданных частотах фазовые и амплитудные свойства исходных последовательностей, даёт возможность при обеспечении требуемой адекватности амплитудно-фазового описания экспериментальной последовательности сократить в 1,5...2 раза длину модельного ряда по сравнению с усеченной экспериментальной последовательностью, путём использования весовой функции значимости частотных диапазонов комплексного спектра.

2. Методика построения линейно-ограниченной авторегрессионной модели позволяет в 1,5 и более раз повысить адекватность описания спектральных характеристик узкополосных сигналов по критерию квадрата длины вектора невязки между контрольным и модельными спектрами за счет сочетания спектрального и корреляционного методов к синтезу модели.

3. Алгоритм моделирования радиотехнических сигналов, учитывающий параметры систем первичной обработки при построении и оптимизации моделей входных процессов, даёт возможность в 3...5 раз сократить порядок линейных параметрических моделей при обеспечении адекватной оценки эффективности функционирования исследуемой системы обработки сигналов по энергетическим критериям.

4. Метод оптимизации параметров авторегрессионных моделей унимодальных по спектру процессов, основанный на процедуре взвешивания вектора коэффициентов авторегрессии поправочным множителем, позволяет сократить в 2...4 раза вычислительные затраты на построение переопределенной авторегрессионной модели путем исключения процедуры перемножения прямоугольных корреляционных матриц моделируемого процесса в переопределенной системе линейных уравнений Юла-Уолкера.

5. Алгоритм расчёта матричных коэффициентов векторной переопределенной авторегрессионной модели даёт возможность в 1,5...4 раза уменьшить относительную ошибку оценки доминантной частоты многокомпонентного процесса по его короткой выборке по сравнению с векторной авторегрессионной моделью того же порядка $p=2...4$. Выигрыш достигается за счет учета ошибок линейного предсказания, выходящих за длину p лага.

6. Способ обнаружения сигналов от непрерывно излучающего вращающегося объекта, обеспечивает выигрыш на 2...3 дБ в пороговом отношении сигнал-шум по сравнению энергетическим приемником и исключает его опорный канал за счет использования результатов спектрального анализа входного процесса и априорной информации о параметрах излучающего объекта.

7. Методика моделирования радиоотражений от подстилающей поверхности даёт возможность в 2...8 раз повысить контрастность неподвижных объектов на фоне местности с известным рельефом по сравнению с существующими методами за счёт использования априорной картографической информации.

Научная новизна диссертации заключается в разработке и обосновании базирующегося на параметрическом моделировании обобщённого подхода к учёту априорной информации о спектрально-временных свойствах сигналов при синтезе радиотехнических систем и устройств с целью повышения их эффективности.

С помощью разработанного подхода к синтезу радиосистем были получены следующие ранее неизвестные **научные результаты**.

1. Разработана методика сокращения длины анализируемых временных последовательностей, основанная на учёте априорной информации о приоритетных спектральных диапазонах, в которых необходимо обеспечивать высокую точность оценки частотных свойств, и тех участках спектра, где допустимо грубое спектральное оценивание.

2. Получена методика построения линейно-ограниченных авторегрессионных моделей, сочетающая спектральный и корреляционный подходы к синтезу моделей при ограничениях на длину экспериментальной выборки.

3. Синтезирован алгоритм построения параметрических моделей радиотехнических сигналов, который учитывает параметры системы их первичной обработки, что даёт возможность сократить вычислительные затраты на моделирование, при сохранении адекватности модели по избранному критерию качества функционирования радиотехнической системы.

4. Разработан метод оптимизации авторегрессионной модели, который исключает перемножение прямоугольных корреляционных матриц моделируемого процесса при учете его старших коэффициентов корреляции с порядками, превышающими порядок модели.

5. Для теоретического обобщения переопределённого уравнения Юла-Уолкера на случай векторного процесса получены аналитические выражения и алгоритмы расчёта матричных коэффициентов векторной авторегрессии.

6. Разработан способ обнаружения сигналов, излучаемых вращающимся объектом, учитывающий априорную информацию о диаграмме направленности его антенны, частотном диапазоне длин волн и параметрах вращения.

7. Создана методика моделирования радиоотражений от земной поверхности с заданной цифровой картой местности, позволяющая выделять новые объекты на ней и компенсировать влияние боковых лепестков диаграммы направленности антенны вне режима доплеровского облучения луча.

Внедрение научных результатов диссертационной работы произведено в разработки 10-ти предприятий и организаций, что подтверждено 10-ю актами внедрения.

1. Методы обработки оптических сигналов в задачах технической, медицинской и дистанционной диагностики — ФГУП «ВЭИ» им. В.И. Ленина, г. Москва; ОАО «Агроэл», г. Рязань.

2. Методы обработки и моделирования радиолокационных сигналов — корпорация «Фазотрон-НИИР», г. Москва; НИИ «Рассвет», г. Рязань.

3. Алгоритмы обработки сигналов бортовых навигационных систем — ОАО «МИЭА», г. Москва.

4. Методы обработки кардиологической информации в задачах диагностики состояния человека — Калужский филиал МГТУ им. Баумана; ООО ЦМП «Истоки здоровья», г. Рязань; ЗАО «Рязанская радиоэлектронная компания», г. Рязань.

5. Компьютерные обучающие средства для изучения вопросов компьютерного моделирования функционирования и проектирования радиотехнических систем и устройств — Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана; Владимирский государственный университет, Рязанский государственный радиотехнический университет.

Апробация работы произведена в форме научных докладов по основным результатам диссертационной работы и дискуссий, которые состоялись более чем на ста научно-технических и научно-практических конференциях, семинарах, симпозиумах и форумах, в том числе на одной Всесоюзной научно-технической конференции, и на более 80-ти Всероссийских и Международных.

Публикации. По теме диссертации опубликовано свыше 180 научных работ, в том числе 33 статьи в изданиях, входящих в список рекомендованных ВАК для опубликования результатов докторских диссертаций по специальности 05.12.04, более 80 тезисов и материалов докладов на Всесоюзных, Всероссийских и Международных научно-технических конференциях, симпозиумах и семинарах; получено 2 ав-

торских свидетельств СССР и 3 патента РФ, в том числе патент на способ обработки сигналов; опубликовано свыше 20 отчётов по имеющим гос. регистрацию НИР и ОКР, в 10-ти из которых автор диссертации был ответственным исполнителем, а в 5-ти — научным руководителем. Кроме того, опубликовано 13 методических и научно-методических трудов, из которых 2 учебных пособия и коллективная монография. Без соавторства издано свыше 30 печатных работ из них 8 статей в журналах, входящих в список рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, библиографического списка из 204 наименований и двух приложений. Диссертация содержит 294 страницы, в том числе 240 страниц основного текста, 11 таблиц и 84 рисунков.

Содержание диссертации

Во введении проведён обзор современного состояния вопросов обработки и моделирования радиотехнических сигналов с частично известными спектральными свойствами. Выявлены проблемы, решение которых позволить существенно развить ряд практических аспектов построения радиотехнических систем диагностики, зондирования и навигации. Обсуждаются предпосылки создания перспективных алгоритмов и устройств, которые легли в основу проведённых диссертационных исследований. Формулируются цели и задачи исследования диссертации, приводятся её общая структура, основные положения, выносимые на защиту и научная новизна. Даются формулировки основных понятий, терминов, вводятся часто используемые в тексте диссертации аббревиатуры и условные обозначения, которые структурированы по единому принципу.

В первой главе отмечается, что одной из ключевых проблем, требующей решения при анализе радиотехнических сигналов, является неприемлемо большой объём экспериментальных выборок, и излагается методика сокращения длины временных последовательностей, основанная на учёте априорной информации о приоритетных спектральных диапазонах, в которых необходимо обеспечивать высокую адекватность описания частотных свойств, и тех участках спектра, где допустимы грубые спектральные оценки. Известные методы, основанные на процедурах частотно-временного прореживания и оптимизации числа уровней квантования, исчерпали свои возможности по сжатию информации, т.к. не предполагают использование априорных данных о приоритетных спектральных диапазонах. На практических примерах, связанных с технической диагностикой, показано, что использование предлагаемой методики даёт возможность сократить в 1,5...2 раза дину

анализируемых выборок при сохранении адекватности амплитудно-фазового описания исследуемого радиотехнического сигнала. Выигрыш достигается за счет учета значимости отдельных спектральных компонент модельных последовательностей при их синтезе.

Цель первой главы — синтез и анализ метода построения моделей сигналов для описания амплитудных и фазовых портретов их спектра Фурье с учётом априорно заданных приоритетных частот.

Показано, что имеется возможность использования комплексного спектра \mathbf{c} экспериментальной временной последовательности $\mathbf{x}=[x_k]$, $k=0, 1, \dots, (N-1)$ в качестве основы для построения её модели $\mathbf{y}=[y_k]$, $k=0, 1, \dots, (M-1)$ с близкими комплексными частотными характеристиками $\mathbf{s}=\mathbf{F}\mathbf{y}$, где компоненты $F_{k,l}$ матрицы \mathbf{F} преобразования Фурье рассчитываются из соотношений: $F_{k,l}=\exp(-i2\pi kl/L)$, $k=0, 1, \dots, (M-1)$; $l=0, 1, \dots, (L-1)$, i — мнимая единица, L — число дискретных частотных отсчетов. Требование к компактности модели предполагает $M < N$. В качестве критерия адекватности моделирования используется величина E нормированного взвешенного квадрата L -мерного вектора $\boldsymbol{\varepsilon}=\mathbf{c}-\mathbf{s}$ невязки:

$$E=(\mathbf{c}-\mathbf{s})^H(\mathbf{c}-\mathbf{s})/L, \quad (1)$$

где \mathbf{c} — имеет смысл контрольного спектра (в данном случае комплексного), H — знак транспонирования и комплексного сопряжения. При введении весовых коэффициентов спектральных отсчетов выражение (1) модифицируется в критерий нормированного взвешенного квадрата E_w длины L -мерного вектора $\boldsymbol{\varepsilon}=\mathbf{c}-\mathbf{s}$ невязки:

$$E_w=[\text{diag}(\mathbf{w})(\mathbf{c}-\mathbf{F}\mathbf{y})]^H[\text{diag}(\mathbf{w})(\mathbf{c}-\mathbf{F}\mathbf{y})]/L \rightarrow \min_{\mathbf{y} \in C^M}, \quad (2)$$

где C^M — комплексное M -мерное пространство, diag — оператор диагонализации; \mathbf{w} — L -мерный вектор-столбец с элементами $w_l \in]0; 1]$, имеющими смысл весов значимости спектральных отсчетов. Единичное значение w_l соответствует наибольшей значимости, а близкое к нулю — малой значимости l -го отсчета s_l вектора \mathbf{s} комплексного спектра последовательности-модели \mathbf{y} .

Оптимальное значение вектора \mathbf{y}_w отсчетов модельной последовательности после взятия производной от (2) по комплексному вектору \mathbf{y} и приравнивания градиента к нулевому вектору:

$$\mathbf{y}_w=(\mathbf{F}^H \text{diag}(\mathbf{w}) \text{diag}(\mathbf{w}) \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^H \text{diag}(\mathbf{w}) \text{diag}(\mathbf{w}) \mathbf{c}. \quad (3)$$

Проанализируем предлагаемую методику моделирования на примере описания экспериментальной последовательности \mathbf{X} дискретных отсчетов мгновенных значений напряжения в высоковольтных кабельных сетях 6-10 кВ при однофазном замыкании на землю. Экспериментальный ряд представляет собой дискретные отсчёты напряжения $3U_0$,

зафиксированные с частотой дискретизации 500 Гц. Запись производилась во время перемежающегося замыкания на землю одного из фидеров высоковольтной электрической подстанции. Наибольшую значимость для селекции аварийного фидера имеют амплитудно-фазовые соотношения гармоник кратных частоте 50 Гц. Поэтому коэффициенты w_l значимости весового вектора \mathbf{w} выбраны равными единице на тех спектральных отсчетах, соответствующих гармоникам 50, 100, 150, 250 Гц, а на остальных частотах значения весов приняты $w_l=0,1$.

С целью оценки эффективности предлагаемой методики был произведён анализ экспериментально полученных нормированных к своему максимальному значению A_{\max} амплитудных спектров $A(f)$ временных рядов \mathbf{x} , \mathbf{y}_w , \mathbf{y}_{cut} , где \mathbf{y}_{cut} — временной ряд, полученный усечением N -компонентного исходного ряда \mathbf{x} до M -компонентного модельного ряда, а также их фазовых спектров $\varphi(f)$. При этом было выявлено, что, несмотря на подобие амплитудных спектров усеченной \mathbf{y}_{cut} и предлагаемой \mathbf{y}_w последовательностей, их фазовые характеристики имеют существенные различия. Так, например, при $N=50$, $M=10$, $L=50$ спектральный отсчет фазы $\varphi(f)$, соответствующий частоте $f=250$ Гц пятой гармоники напряжения $3U_0$, усеченной последовательности \mathbf{y}_{cut} не отражает адекватно фазу исходной последовательности (ошибки достигают 150°), а значения фаз на частотах гармоник, кратных 50 Гц, для исходной и предлагаемой последовательностей \mathbf{y}_w фактически совпадают (ошибки составляют единицы градусов).

Для более полной объективной оценки эффективности описания исходной последовательности \mathbf{x} проанализируем квадраты нормированных длин $E_w=|\boldsymbol{\varepsilon}_w|^2/L$, $E_{\text{cut}}=|\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{cut}}|^2/L$ векторов $\boldsymbol{\varepsilon}_w=\text{diag}(\mathbf{w})(\mathbf{c}-\mathbf{F}\mathbf{y}_w)$, $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{cut}}=\text{diag}(\mathbf{w})(\mathbf{c}-\mathbf{F}\mathbf{y}_{\text{cut}})$ взвешенных невязок $\boldsymbol{\varepsilon}_w$, $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{cut}}$ для предлагаемой \mathbf{y}_w и усеченной \mathbf{y}_{cut} последовательностей соответственно. В приведенном выше примере выигрыш $\mu=E_w/E_{\text{cut}}$ в отношении величин квадратов нормированных длин векторов невязок составляет величину $\mu\approx 2,9$ раза при $E_w\approx 69,9$ и $E_{\text{cut}}\approx 207,1$.

Выигрыши $\mu>1$ сохраняются при наращивании длин M модельной \mathbf{y}_w и усеченной \mathbf{y}_{cut} выборок и достигают 8,62 раз при $M=44$. Отметим, что для изложенной в первой главе методики равенство значимости спектральных отсчетов — это лишь частный случай при $\text{diag}(\mathbf{w})=\mathbf{W}=\mathbf{I}$, когда выражение (3) вырождается в систему нормальных линейных уравнений с ортогональной матрицей \mathbf{F} преобразований:

$$\mathbf{y}_{\text{cut}}=(\mathbf{F}^H\mathbf{F})^{-1}\mathbf{F}^H\mathbf{c}=\mathbf{F}^H\mathbf{c}/L. \quad (4)$$

Поэтому предложенный подход к описанию временных рядов представляет собой теоретическое обобщение известных (4) методов оптимизации их длины.

Таким образом, в первой главе предложен метод описания исходных временных экспериментальных последовательностей, который состоит в синтезе коротких модельных временных рядов, сохраняющих на заданных частотах фазовые и амплитудные свойства исходных последовательностей. Выигрыш μ по сравнению с известными процедурами усечения исходных временных последовательностей достигается за счет учета значимости отдельных спектральных отсчетов модельных последовательностей при их синтезе. Использование предложенной методики оптимизации длины исходного временного ряда позволяет до 2-х раз уменьшить вычислительные и аппаратные затраты на последующие анализ, обработку и запоминание цифровых отсчетов радиотехнических сигналов при априорных сведениях об их приоритетных частотных диапазонах.

Вторая глава посвящена расширению возможностей изложенного в первой главе метода учёта априорных сведений о процессе при их наличии не только в спектральной, но и в корреляционной (временной) области. Показано, что формализовать такую распределённую информацию общего характера можно, накладывая линейные ограничения на параметры моделей стохастических радиотехнических сигналов.

Цель второй главы — синтезировать метод оценки параметров авторегрессии при линейных ограничениях для построения моделей радиотехнических сигналов. Показано, что введение линейных ограничений даёт возможность учесть априорную информацию о характере моделируемого сигнала, распределённую в спектральной и корреляционной (временной) областях.

Как показали эксперименты над сигналами, характерными для различных областей радиотехники, спектральный и корреляционный подходы к синтезу авторегрессионных моделей дают неодинаковые результаты, что связано с практическими ограничениями временного и вычислительного характера. Предложено объединить оба подхода решая задачу условной минимизации, при которой вектор \mathbf{a} коэффициентов авторегрессии удовлетворяет линейным ограничениям следующего вида:

$$\mathbf{R}\mathbf{a} \rightarrow \mathbf{i}, \quad (5)$$

где \mathbf{R} — $[(p+c+1) \times (p+1)]$ -мерная матрица оценок коэффициентов корреляции, c — глубина переопределённости системы уравнений; \mathbf{a} — $(p+1)$ -мерный вектор коэффициентов авторегрессионного (АР) моделирующего фильтра, \mathbf{i} — $(p+c+1)$ -мерный крайний левый вектор-столбец единичной матрицы \mathbf{I} . С учётом ограничений (5) критерий (2) для наименьших квадратов ошибок модифицируется. При $\text{diag}(\mathbf{w})=\mathbf{I}$ для нахождения оценок \mathbf{a} при решении задачи условной минимизации

воспользуемся функцией L Лагранжа:

$$L = [\text{diag}(\mathbf{c})\mathbf{F}\mathbf{a} - \mathbf{e}]^H [\text{diag}(\mathbf{c})\mathbf{F}\mathbf{a} - \mathbf{e}] - 2\boldsymbol{\lambda}^H (\mathbf{R}\mathbf{a} - \mathbf{i}), \quad (6)$$

где $\boldsymbol{\lambda}$ — $(p+c+1)$ -мерный вектор-столбец множителей Лагранжа, \mathbf{e} — вектор-столбец, состоящий из L единиц, т.е. $\mathbf{e} = [1, 1, \dots, 1]^T$.

Возьмем производные от функции L (6) по неизвестным параметрам — вектору $\boldsymbol{\lambda}$ множителей Лагранжа и вектору \mathbf{a} коэффициентов авторегрессии:

$$\partial L / \partial \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{R}\mathbf{a} - \mathbf{i},$$

$$\partial L / \partial \mathbf{a} = 2 \{ [\text{diag}(\mathbf{c})\mathbf{F}]^H [\mathbf{e} - \text{diag}(\mathbf{c})\mathbf{F}\mathbf{a}] - \mathbf{R}^H \boldsymbol{\lambda} \}. \quad (7)$$

Найдём оценки \mathbf{a}_0 параметров авторегрессионной модели по методу наименьших квадратов при линейных ограничениях (5):

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_0 &= [\mathbf{F}^H \text{diag}(\mathfrak{s})^* \text{diag}(\mathfrak{s}) \mathbf{F}]^{-1} [\mathbf{F}^H \text{diag}(\mathfrak{s})^H \mathbf{e} - \mathbf{R}^H \boldsymbol{\lambda}] = \\ &= \mathbf{a}_s - [\mathbf{F}^H \text{diag}(\mathfrak{s})^* \text{diag}(\mathfrak{s}) \mathbf{F}]^{-1} \mathbf{R}^H \boldsymbol{\lambda}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $*$ — знак комплексного сопряжения, \mathbf{a}_s — $(p+1)$ -мерный вектор-столбец параметров авторегрессионной модели без учета линейных ограничений (5), рассчитанный по спектральному критерию:

$$\mathbf{a}_s = \{ [\text{diag}(\mathbf{c}) \mathbf{F}]^H [\text{diag}(\mathbf{c}) \mathbf{F}] \}^{-1} [\text{diag}(\mathbf{c}) \mathbf{F}]^H \mathbf{e}. \quad (9)$$

Тогда можно выразить искомым вектор $\boldsymbol{\lambda}$ множителей Лагранжа через известные до введения линейных ограничений параметры:

$$\boldsymbol{\lambda} = \{ \mathbf{R} [\mathbf{F}^H \text{diag}(\mathbf{c})^* \text{diag}(\mathbf{c}) \mathbf{F}]^{-1} \mathbf{R}^H \}^{-1} (\mathbf{R}\mathbf{a}_s - \mathbf{i}), \quad (10)$$

т.е. если ограничения (5) выполнены моделью строго и $\mathbf{R}\mathbf{a}_s - \mathbf{i} = \mathbf{0}$, то $\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0}$ и $\mathbf{a}_0 = \mathbf{a}_s$, поэтому предложенный метод нахождения \mathbf{a}_0 можно считать теоретическим обобщением, приводящим в частных случаях к известным решениям (9) при отсутствии линейных ограничений. После подстановки значений $\boldsymbol{\lambda}$ из (10) в (8) получим:

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_0 &= \mathbf{a}_s - [\mathbf{F}^H \text{diag}(\mathbf{c})^* \text{diag}(\mathbf{c}) \mathbf{F}]^{-1} \mathbf{R}^H \times \\ &\times \{ \mathbf{R} [\mathbf{F}^H \text{diag}(\mathbf{c})^* \text{diag}(\mathbf{c}) \mathbf{F}]^{-1} \mathbf{R}^H \}^{-1} (\mathbf{R}\mathbf{a}_s - \mathbf{i}). \end{aligned} \quad (11)$$

Выражение (11) дает возможность расчёта коэффициентов авторегрессионной модели с учетом априорной информации о моделируемом процессе, распределенной как в спектральной, так и в корреляционной областях.

Как показали эксперименты, при синтезе авторегрессионных моделей спектральных характеристик сигнатур непрерывно излучающего вращающегося объекта типа самоприцеливающегося противотанкового боеприпаса М898 класса SADARM предлагаемый комбинированный подход даёт возможность улучшить в 1,5...3 раза адекватность моделирования по критерию (1) минимума среднеквадратического отклонения модельного \mathbf{s} и контрольного \mathbf{c} спектров.

Рассмотренное в данной главе распределение априорной информации о процессе в спектральной и во временной областях характерно при частично известных параметрах системы обработки моделируемых

сигналов, характеристики которой можно учесть. Примерами таких характеристик могут служить заранее известные зоны режекции или длительности переходных процессов цифровых фильтров. Поэтому следующая глава посвящена учёту подобных параметров систем первичной обработки радиотехнических сигналов для оптимизации их моделей.

В третьей главе диссертации решаются вопросы построения фильтров авторегрессии для задач моделирования стохастических процессов с целью исследования эффективности выделения сигналов на фоне коррелированных помех. Приводятся результаты оптимизации параметрических моделей, построенных по введённому критерию минимума модуля отклонений между теоретическим и экспериментальным коэффициентами подавления помех исследуемой системы первичной обработки. Показано, что имеется возможность уменьшить порядок моделей в 1,5...2 раза при обеспечении требуемой адекватности моделирования или улучшить качество моделирования по введённому энергетическому критерию в 3...4 раза при сохранении порядка моделирующего фильтра за счет применения переопределенной системы уравнений Юла-Уолкера и использования априорных сведений о характеристиках исследуемой системы первичной обработки.

Цель третьей главы — оптимизация авторегрессионных моделей радиотехнических сигналов с учетом заданных характеристик системы первичной обработки для исследования эффективности подавления коррелированных помех.

Традиционные подходы к построению моделей, предназначенных для анализа эффективности функционирования систем первичной обработки сигналов, не связаны с характеристиками самих анализируемых систем. Это приводит к усложнению моделей, ориентированных на описание всех компонент процесса, в том числе и тех, которые будут заведомо подавлены системой обработки, в частности режекторным фильтром.

Для количественного оценивания адекватности модели помех использован критерий минимума модуля отклонений $\Delta\varepsilon$ в коэффициентах подавления мешающих компонент:

$$\Delta\varepsilon = |k_{\text{opt}} - k_{\text{exp}}| \rightarrow \min, \quad (12)$$

где k_{opt} — коэффициент подавления помех, рассчитанный теоретически, k_{exp} — коэффициент подавления, полученный экспериментально путём моделирования по выражению

$$k_{\text{exp}} = \frac{\bar{\mathbf{y}}_n^{\text{T}*} \mathbf{y}_n}{\bar{\mathbf{x}}_n^{\text{T}*} \mathbf{x}_n},$$

где \mathbf{y}_n , \mathbf{x}_n — n -мерные вектора дискретных отсчетов на входе и выходе фильтра обработки соответственно.

Показано, что предлагаемые методы оптимизации АР-моделей дают возможность существенно улучшить адекватность их имитации для анализа эффективности функционирования устройств подавления помех. Так, для одномодовых по спектру случайных процессов удается улучшить качество моделирования в 3...4 раза по критерию (1) СКО, а выигрыш по критерию (12) модулей $\Delta\epsilon$ отклонений между экспериментальным k_{exp} и теоретическим k_{opt} коэффициентами подавления помех составляет величину 8,7...14,8 дБ за счет применения переопределенной системы уравнений Юла-Уолкера

$$\begin{bmatrix} r_0 & r_{-1} & \cdots & r_{1-p} \\ r_1 & r_0 & \cdots & r_{2-p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{p-1} & r_{p-2} & \cdots & r_0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{s-1} & r_{s-2} & \cdots & r_{s-p-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_s \end{bmatrix} \quad (13)$$

для расчетов по коэффициентам r_k автокорреляции помехи АР-коэффициентов a_k , моделирующего фильтра при оптимизируемой глубине s переопределенности $c=s-p$ ($s>p$). При $s=p$ (13) вырождается в нормальное уравнение Юла-Уолкера для АР-процесса, которое представляет собой частный случай (13). Из анализа по (12) качества моделирования следует, что для имитации узкополосных мешающих процессов в задаче анализа, например, эффективности систем селекции движущихся целей в радиолокационных комплексах рекомендуется ограничиться низкими ($p<6...10$) порядками АР-моделей при $2p>c\geq p$. Отметим, что снижение порядка p моделирующего фильтра не только сокращает вычислительные затраты, необходимые для имитации мешающих процессов, но и даёт возможность оптимизации порядка g обеляющего их фильтра. Введение дополнительных факторов, связанных с априорными сведениями о системе обработки, приводит к необходимости учёта $c=s-p$ высших коэффициентов корреляции радиотехнических сигналов, т.е. к повышению вычислительной сложности при нахождении параметров a_k их моделей. Вычислительные проблемы обусловлены необходимостью решения переопределённых систем уравнений, поэтому следующая глава посвящена вычислительным аспектам нахождения коэффициентов квазиобратных корреляционных матриц. При этом уделяется внимание не только сокращению вычислительных затрат, но и решению задач, связанных с обеспечением обращения матриц при их плохой обусловленности и с учётом ограниченной разрядности цифровых радиотехнических устройств.

В четвёртой главе диссертации предлагается и исследуется метод синтеза линейных переопределённых авторегрессионных моделей радиотехнических сигналов не требующий квазиобращения их корреляционных матриц. Метод основан на процедуре взвешивания вектора коэффициентов авторегрессии поправочным множителем. Показано, что имеется возможность сократить в 2...4 раза вычислительные затраты на построение переопределённой авторегрессионной модели радиотехнических сигналов путем исключения процедуры перемножения прямоугольных корреляционных матриц моделируемого процесса в переопределённой системе линейных уравнений Юла-Уолкера.

Цель четвёртой главы — разработка методики синтеза модифицированных переопределённых авторегрессионных моделей радиотехнических сигналов, которая дает возможность исключить процедуру квазиобращения корреляционных матриц при нахождении коэффициентов вектора $\mathbf{a}=[a_k]$ авторегрессии.

Показано, что существует возможность найти поправочный коэффициент χ , домножение на который вектора \mathbf{a} , полученного из решения системы уравнений Юла-Уолкера при $c=0$, позволяет скорректировать АР-модели радиосигналов, повысив адекватность их описания в ряде случаев до уровня переопределённых АР-моделей (13).

В отличие от традиционного подхода в уравнение линейной авторегрессии введен дополнительный множитель χ :

$$y_n = x_n - \chi \mathbf{a}^T \mathbf{y}, \quad (14)$$

который взвешивает p -мерный вектор-столбец \mathbf{a} преобразующий p -мерный вектор-столбец \mathbf{y} выходных отсчетов y_j моделирующего фильтра в очередной модельный отсчёт y_n при $j=(n-1)\dots(n-p)$. Вектор \mathbf{a} можно найти из уравнения Юла-Уолкера для АР-процесса:

$$\mathbf{a} = -\mathbf{R}^{-1} \mathbf{r}, \quad (15)$$

где \mathbf{R} — $(p \times p)$ -мерная корреляционная матрица моделируемого процесса, $\mathbf{r}^T = [r_{1,0}; r_{2,0}; \dots; r_{p,0}]$ — p -мерный крайний левый вектор-столбец $(p+1) \times (p+1)$ -мерной матрицы \mathbf{R} без ее верхнего элемента $r_{0,0}$.

При использовании переопределённой системы уравнений, т.е. при переходе к квазиобращению дополненной c строками матрицы \mathbf{R} , выражение (15) модифицируется:

$$\tilde{\mathbf{a}} = -(\tilde{\mathbf{R}}^H \tilde{\mathbf{R}})^{-1} \tilde{\mathbf{R}}^H \tilde{\mathbf{r}}, \quad (16)$$

где $\tilde{\mathbf{a}}$ — модифицированный вектор авторегрессии, найденный из переопределённой системы линейных уравнений; $\tilde{\mathbf{R}}$, $\tilde{\mathbf{r}}$ — $(p+c) \times p$ -мерная корреляционная матрица и $(p+c)$ -мерный вектор-столбец автокорреляции (соответственно), дополненные c строками. По выражению (15) рассчитывается вектор \mathbf{a} авторегрессии, а на втором этапе определяется корректирующий множитель χ , учитывающий информацию о до-

полнительных c коэффициентах корреляции (c строках $\tilde{\mathbf{R}}$ и $\tilde{\mathbf{r}}$). Для расчета χ , как и для нахождения решения $\tilde{\mathbf{a}}$ при квазиобращении в (16), используется критерий минимума квадрата длины E вектора $\boldsymbol{\varepsilon}$ невязки:

$$E = \boldsymbol{\varepsilon}^H \boldsymbol{\varepsilon}, \text{ где } \boldsymbol{\varepsilon} = \tilde{\mathbf{r}} + \chi \tilde{\mathbf{R}} \mathbf{a}. \quad (17)$$

Фактически величина длины E вектора $\boldsymbol{\varepsilon}$ невязок обобщённо характеризует точность решения переопределённой системы линейных уравнений вида $\chi \tilde{\mathbf{R}} \mathbf{a} \rightarrow \tilde{\mathbf{r}}$ по критерию среднеквадратического отклонения взвешенного величиной χ вектора $\tilde{\mathbf{R}} \mathbf{a}$ полученных решений от вектора $(\tilde{\mathbf{r}})$ желаемых решений. Тогда (17) описывает целевую функцию:

$$E = (\tilde{\mathbf{r}} + \chi \tilde{\mathbf{R}} \mathbf{a})^H (\tilde{\mathbf{r}} + \chi \tilde{\mathbf{R}} \mathbf{a}) \rightarrow \min_{\chi \in C}, \quad (18)$$

где C — пространство комплексных чисел.

Оптимальная величина χ_{opt} корректирующего множителя χ :

$$\chi_{\text{opt}} = -(\mathbf{a}^H \tilde{\mathbf{R}} \tilde{\mathbf{R}} \mathbf{a})^{-1} \text{Re}(\mathbf{a}^H \tilde{\mathbf{R}}^H \tilde{\mathbf{r}}), \quad (19)$$

где Re — оператор выделения действительной части. Эффективность предложенной методики оценивалась по (1) и отражена на рисунке 1 в виде зависимости десятичного логарифма величины E от относительной мощности λ некоррелированного шума при $L=512$.

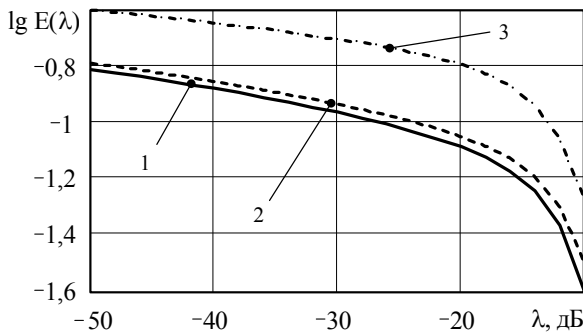


Рисунок 1

На рисунке 1 обозначены: сплошной линией 1 — нормированный квадрат длины E вектора $\boldsymbol{\varepsilon}$ невязки для переопределенной модели (16); пунктирной линией 2 — аналогичная величина для предлагаемой модифицированной модели; штрихпунктирной линией 3 — для обычной AP-модели (15).

Таким образом, в четвёртой главе показано, что предлагаемый модифицированный метод нахождения коэффициентов переопределенной AP-модели полимодальных по спектру радиотехнических сигналов дает возможность существенно (в 2...4 раза) сократить вычислительные затраты по сравнению с традиционным методом расчета коэффициентов a_k линейной авторегрессии путем квазиобращения прямо-

угольной корреляционной матрицы $\tilde{\mathbf{R}}$ моделируемого процесса, представляющую собой дополненную c строками $(p \times p)$ -мерную корреляционную матрицу \mathbf{R} .

Сокращение вычислительных затрат достигается за счет исключения перемножения прямоугольных корреляционных матриц при решении переопределенной системы уравнений и замены этой процедуры на свертку крайних левых векторов-столбцов корреляционных матриц для нахождения поправочного коэффициента χ с последующим домножением на него вектора \mathbf{a} авторегрессии, полученного из решения нормального уравнения Юла-Уолкера для АР-процесса.

Отметим, что рассмотренные процедуры параметрического моделирования охватывают лишь класс одномерных сигналов, а ряд радиотехнических приложений подразумевает работу с векторными процессами.

Пятая глава посвящена теоретическому обобщению изложенного ранее материала на многомерный случай, когда несколько статистически связанных радиотехнических сигналов с выходов набора датчиков одновременно поступают в систему обработки. Рассмотрена задача построения авторегрессионной модели сигнала, представленного многомерными коррелированными наблюдениями, сделанными одновременно. Предложено использовать переопределенную векторную авторегрессионную модель. Показано, что её применение даёт возможность в 1,5...4 раза уменьшить относительную ошибку оценки положения спектральных мод по сравнению с обычной векторной авторегрессией того же порядка $p=2...5$. Выигрыш достигается за счет учета ошибок линейного предсказания, выходящих за длину p лага.

Цель пятой главы — построение и оптимизация векторных авторегрессионных моделей (VAR — Vector Autoregression, англ.) для задач параметрического спектрального анализа многомерных радиотехнических сигналов.

В ряде практических приложений результаты наблюдений за объектом, поступающие по M различным информационным каналам, могут быть представлены в виде реализации \mathbf{X} дискретного векторного M -мерного случайного процесса:

$$\mathbf{X}=[\mathbf{x}_0; \mathbf{x}_1; \dots; \mathbf{x}_t; \dots; \mathbf{x}_{T-1}], \quad (20)$$

где $\mathbf{x}_t=[x_{0,t}; x_{1,t}; \dots; x_{m,t}; \dots; x_{M-1,t}]^T$ — M -мерный векторный t -й временной отсчёт наблюдаемого процесса; $x_{m,t}$ — значение t -го наблюдения в m -м канале (на выходе m -го датчика); T — количество векторных отсчётов \mathbf{x}_t в реализации \mathbf{X} ; $m=0, 1, \dots, M-1$; $t=0, 1, \dots, T-1$.

Математическое описание векторного процесса \mathbf{X} линейной авторегрессионной моделью предполагает, что текущий M -компонентный

отсчёт \mathbf{x}_t может быть выражен через аддитивную взвешенную сумму p предыдущих отсчётов:

$$\mathbf{x}_t = \sum_{k=1}^p \mathbf{A}_k \mathbf{x}_{t-k} + \boldsymbol{\varepsilon}_t, \quad (21)$$

где $\boldsymbol{\varepsilon}_t$ — M -мерный вектор-столбец t -го векторного отсчёта $\boldsymbol{\varepsilon}_t = [\varepsilon_{0,t}; \varepsilon_{1,t}; \dots; \varepsilon_{m,t}; \dots; \varepsilon_{M-1,t}]^T$ реализации $\boldsymbol{\varepsilon} = [\boldsymbol{\varepsilon}_0; \boldsymbol{\varepsilon}_1; \dots; \boldsymbol{\varepsilon}_t; \dots; \boldsymbol{\varepsilon}_{T-p-1}]$ векторного процесса ошибки линейного предсказания; $\mathbf{A}_k = [A_{j,j_k}]$ — $(M \times M)$ -мерная матрица k -го коэффициента линейного предсказания, $j=0, 1, \dots, M-1$; $i=0, 1, \dots, M-1$.

Структурная схема векторного авторегрессионного фильтра изображена на рисунке 2.

Для нахождения неизвестных p $(M \times M)$ -мерных коэффициентов \mathbf{A}_k удобно представить их как единую $(M \times pM)$ -мерную матрицу $\mathbf{A} = [\mathbf{A}_1; \mathbf{A}_2; \dots; \mathbf{A}_k; \dots; \mathbf{A}_p]$, которая является аналогом вектора коэффициентов скалярной линейной авторегрессии при описании одномерного процесса. Тогда уравнение (21) можно представить в следующем виде:

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{A} \tilde{\mathbf{x}}_{t-1} + \boldsymbol{\varepsilon}_t, \quad (22)$$

где $\tilde{\mathbf{x}}_{t-1}$ — pM -мерный вектор-столбец предыдущих $t-p$ значений реализации \mathbf{X} , которые сгруппированы последовательно, $\tilde{\mathbf{x}}_{t-1}^T = [\mathbf{x}_{t-1}^T; \mathbf{x}_{t-2}^T; \dots; \mathbf{x}_{t-k}^T; \dots; \mathbf{x}_{t-p}^T]$.

Предлагается для моделирования многомерных радиотехнических процессов использовать не одну $\boldsymbol{\varepsilon}_t$, а целую серию из c ошибок $\boldsymbol{\varepsilon}_t, \boldsymbol{\varepsilon}_{t+1}, \dots, \boldsymbol{\varepsilon}_{t+c}$ линейного предсказания:

$$[\mathbf{x}_t; \mathbf{x}_{t+1}; \dots; \mathbf{x}_{t+c}] = \mathbf{A}_p [\tilde{\mathbf{x}}_{t-1}; \tilde{\mathbf{x}}_t; \dots; \tilde{\mathbf{x}}_{t+c-1}] + [\boldsymbol{\varepsilon}_t; \boldsymbol{\varepsilon}_{t+1}; \dots; \boldsymbol{\varepsilon}_{t+c}], \quad (23)$$

где \mathbf{A}_p — матрица коэффициентов переопределённой векторной авторегрессионной модели.

После домножения (23) на матрицу $[\tilde{\mathbf{x}}_{t-1}; \tilde{\mathbf{x}}_t; \dots; \tilde{\mathbf{x}}_{t+c-1}]^H$, усреднения по t и учёта обстоятельства некоррелированности отсчётов $\varepsilon_{m,t}$ реализации $\boldsymbol{\varepsilon}$ процесса ошибки линейного предсказания, получим:

$$\mathbf{k}_p = \mathbf{A}_p \mathbf{K}_p + \mathbf{0}_p \iff \mathbf{A}_p = \mathbf{k}_p \mathbf{K}_p^{-1}, \quad (24)$$

где $\mathbf{k}_p, \mathbf{K}_p$ — прямоугольная $(M \times pM)$ -мерная и квадратная $(pM \times pM)$ -мерная матрицы обобщённой ковариации.

Анализ эффективности предлагаемой методики векторного спектрального анализа произведён на примерах описания экспериментальных M -мерных последовательностей \mathbf{X} , состоящих из T дискретных временных отсчётов и полученных из различных областей радиотехники. Например, рассматривалось телевизионное изображение вращаю-

щегося космического объекта, представленное тремя ($M=3$) компонентами видимого диапазона: красной (R), зелёной (G) и синей (B).

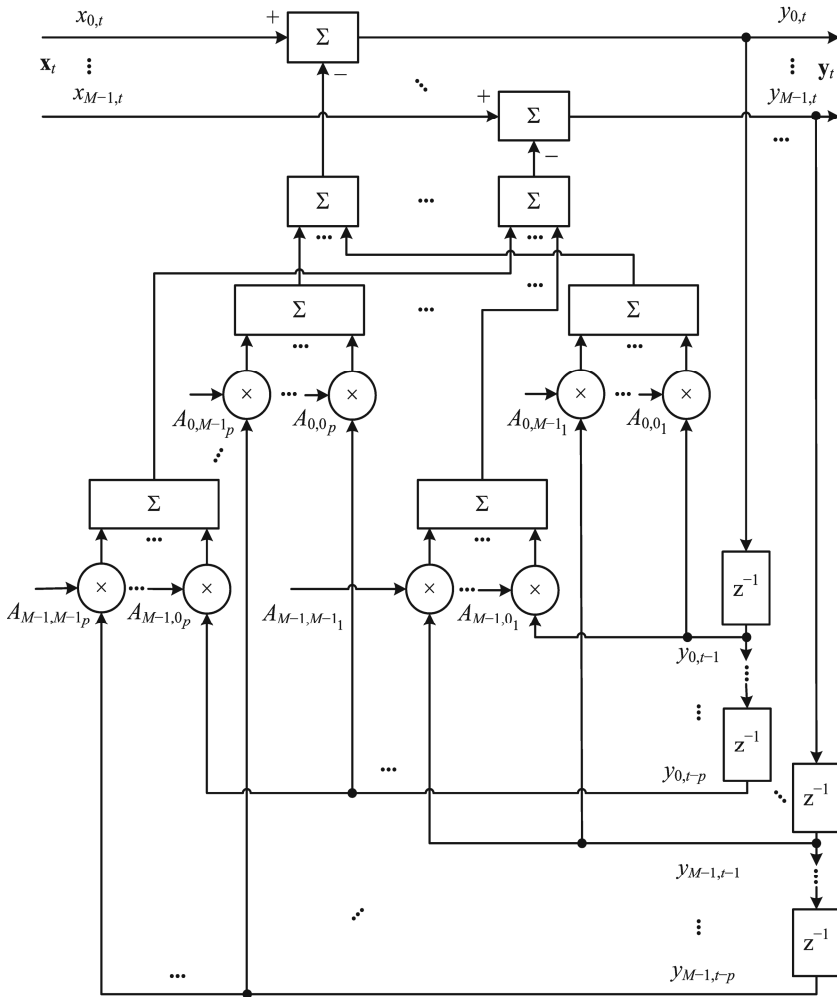


Рисунок 2

По каждому кадру видеопоследовательности, фиксировались интенсивности I для трёх цветов: I_R для красного (R), I_G для зелёного (G) и I_B для синего (B) в относительных единицах.

В рассматриваемой задаче дистанционной технической диагностики космического аппарата анализ спектрального состава изменения

интенсивности I световых отражений предполагал выделение одной-двух доминантных гармонических компонент. Поэтому целесообразно ограничиться спектральным анализом, основанным на векторной параметрической авторегрессионной модели второго порядка $p=2$.

Проведём оценку результативности предложенной методики спектрального анализа по каждому из $M=3$ цветов по критерию:

$$\Delta F = \left| \hat{F} - F \right| / F, \quad (25)$$

где ΔF — отклонения оцененных доминантных частот \hat{F} изменения интенсивности цветов от истинных значений доминантных частот F .

Зависимости ΔF от глубины c переопределённости для рассмотренного примера, выраженные в процентах, приведены на рисунке 3, на котором относительные отклонения ΔF_R , ΔF_G , ΔF_B для красного R, зелёного G и синего B цветов изображены точечной, пунктирной и штрихпунктирной линиями соответственно.

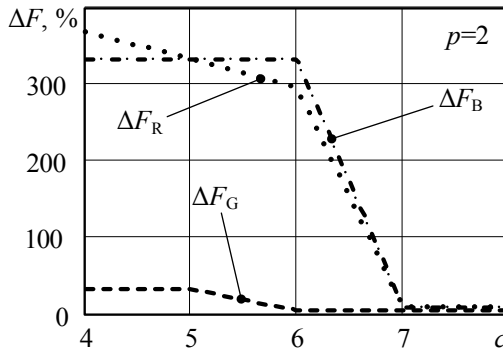


Рисунок 3

Из рисунка 3 видно, что относительные отклонения ΔF_R , ΔF_G , ΔF_B существенно (до 3...3,5 раза) уменьшаются при наращивании глубины c переопределённости векторной авторегрессионной модели анализируемого порядка $p=2$.

Таким образом, в пятой главе показано, что имеется возможность повышения точности по критерию (25) параметрических векторных спектральных оценок радиотехнических процессов путём введения в векторную авторегрессионную (VAR) модель заданного порядка p переопределённости оптимизируемой глубины c . Выигрыши составляют несколько (1,5...4) раз и достигаются за счёт учёта c старших матричных коэффициентов \mathbf{K}_k ковариации при нахождении матрицы \mathbf{A}_p параметров векторной авторегрессионной модели при $k=(p+1)...c$.

Так, например, использование переопределённых векторных авторегрессионных моделей для описания навигационных сигналов, полу-

ченных совместно инерциальными системами и спутниковыми (ГЛОНАСС, GPS), даёт возможность по короткой (десятки минут, единицы часов) выборке построить модель процессов ошибки оценки географических координат объекта в условиях воздействия помех. Подобные модели позволяют апробировать алгоритмы и устройства обработки радиотехнических сигналов, представляющих собой реализации векторных коррелированных процессов. Получение адекватных и компактных с вычислительной точки зрения моделей даёт возможность построения эффективных алгоритмов, устройств и систем обработки, которые рассмотрены в следующей главе.

В шестой главе диссертации рассмотрены задачи синтеза систем обработки радиотехнических сигналов, основанного на их параметрических моделях, построению которых посвящены предыдущие главы диссертации. Затронуты вопросы, касающиеся как выделения полезных периодических радиосигналов, так и подавления мешающих коррелированных компонент наблюдений, имеющих скалярный или векторный характер. Предложено использовать переопределенную векторную авторегрессионную модель мешающего процесса для синтеза векторных обеляющих фильтров. При этом приводится пример решения задачи повышения точности начальной выставки бесплатформенной инерциальной микромеханической навигационной системы при вибрациях корпуса её носителя. Показано, что при использовании векторного обеляющего фильтра небольшого порядка $p=3\dots 7$ для одновременной обработки сигналов с выходов серии акселерометров удаётся в $1,2\dots 1,6$ раза уменьшить дисперсию ошибки начальной выставки по сравнению с результатами раздельной фильтрации сигналов с выходов отдельных акселерометров. Выигрыш достигается за счет учета взаимной корреляции сигналов с выходов различных акселерометров при синтезе векторного обеляющего фильтра.

Точность работы бортовой навигационной системы связана с возможностями по радиолокационному обнаружению наземных малоподвижных или неподвижных объектов при известном рельефе местности. Рельеф местности задаётся в виде её цифровой карты, на основе которой формируется параметрическая модель ожидаемых радиоотражений, а затем синтезируется система обработки радиосигналов.

Цель шестой главы — синтез систем обработки радиотехнических сигналов на основе их параметрического спектрального анализа.

Приводится пример решения задачи подавления мешающих периодических изменений, связанных с вибрациями корпуса носителя бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС), в реализации X анализируемого векторного процесса с выходов M аксе-

лерометров. Синтез обеляющего фильтра основан на представлении \mathbf{X} в виде линейной векторной авторегрессии, которая предполагает, что текущий M -компонентный отсчёт \mathbf{x}_t процесса может быть выражен через аддитивную взвешенную сумму его p предыдущих отсчётов:

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{x}_t - \sum_{k=1}^p \mathbf{A}_k \mathbf{x}_{t-k} . \quad (26)$$

Проанализируем предлагаемую методику обеления выходных сигналов \mathbf{X} с выходов трёх ($M=3$) акселерометров, входящих в состав интегрированной микромеханической системы ADIS фирмы Analog Devices, фиксирующих ускорения по трём ортогональным осям связанной с носителем системы координат. Носитель подвергался воздействиям вибраций, которые были вызваны работой его двигательной установки. Предполагалось, что начальную выставку необходимо производить в условиях её непрерывного функционирования. В качестве контрольного примера была произведена начальная выставка при заглушенном двигателе и неподвижном носителе. Частота выдачи данных с выходов акселерометров составляла около 70 Гц, т.к. интервал дискретизации 0,014 с задан в качестве базового в БИНС серии ADIS. В ходе экспериментов была выявлена взаимная корреляция различных компонент сигнала \mathbf{X} , поэтому был применён для его обеления векторный фильтр. Его порядок p можно ограничить небольшими величинами ($p=2\dots 10$) ввиду того, что анализ спектрального состава компонент \mathbf{x}_m показал наличие нескольких (2...5) доминантных гармоник лежащих в диапазоне частот от нуля до $F=15$ Гц.

Оценим эффективность обработки трёхкомпонентного ($M=3$) сигнала \mathbf{X} обычным скалярным и предлагаемым векторным обеляющими фильтрами различных порядков $p=1\dots 10$. В качестве критерия эффективности используем суммарную дисперсию D_Σ всех $M=3$ компонент процесса на выходе фильтров:

$$D_\Sigma = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} D_m = \frac{D_0 + D_1 + D_2}{3} , \quad (27)$$

где D_m — дисперсия m -й компоненты процесса на выходе фильтра. Длительность T наблюдения составляла 5 секунд, т.е. было проанализировано 350 отсчётов процесса \mathbf{X} при заданном выше интервале дискретизации. Результаты анализа функционирования векторного обеляющего фильтра приведены на рисунке 4, на котором сплошной линией показана зависимость эффективности по критерию (27) от порядка p фильтра для предлагаемой векторной процедуры фильтрации сигналов \mathbf{X} с выходов акселерометров, а пунктирная кривая отражает ана-

логичную зависимость для независимой обеляющей фильтрации по каждому каналу измерения ускорения.

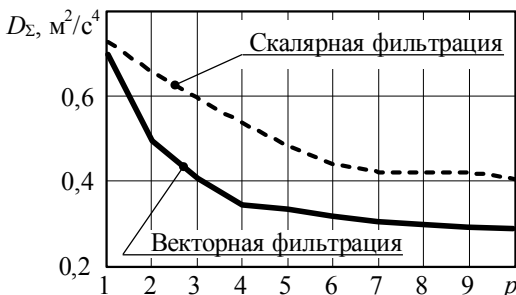


Рисунок 4

Анализ зависимостей, представленных на рисунке 4, показывает, что, например, при порядках $p=4$ эффективность D_{Σ} обработки сигналов X с выходов акселерометров возрастает более чем в 1,54 раза при использовании векторного обеляющего фильтра с матричными коэффициентами A , вместо $M=3$ независимых скалярных обеляющих фильтров.

Задача коррекции бортовой автономной навигационной системы решалась с помощью анализа радиолокационных изображений (РЛИ) с выделением на эталонной карте опорных сегментов подстилающей поверхности — радиоконтрастных областей (крупных искусственных сооружений, береговых линий и т.п.). Подобная коррекция особенно актуальна при сложных условиях навигации, например, когда носитель попадает в область затенений сигналов GPS, ГЛОНАСС или радионавигационные сигналы подавлены помехами. Для поиска на РЛИ характерных объектов на местности, присутствующих на цифровой топографической карте, создана процедура имитации радиолокационных отражений от поверхности Земли по цифровой карте её рельефа, состоящая из четырёх этапов: 1) формирование растровой топографической карты высот и дополнение ее признаками типа поверхности; 2) создание рельефа поверхности на основе триангуляционной аппроксимации путем разбиения на элементарные фрагменты (треугольники); 3) определение свойств элементарных треугольных сегментов рельефа исходя из заданного положения носителя РЛС и рассматриваемого участка поверхности; 4) расчет мощности отражения от поверхности на основе параметров анализируемой РЛС и свойств (площадь, направление нормали, материал) элементарных фрагментов поверхности.

Как показали натурные эксперименты, предлагаемая методика моделирования даёт возможность адекватно отображать радиоотражения

от подстилающей поверхности с известными рельефом местности и расположением крупных наземных радиоконтрастных объектов (береговых линий, мостов, характерных складок местности и т.п.). На рисунке 5 приведены реальное (слева) и модельное (справа) радиоизображения наземных объектов.

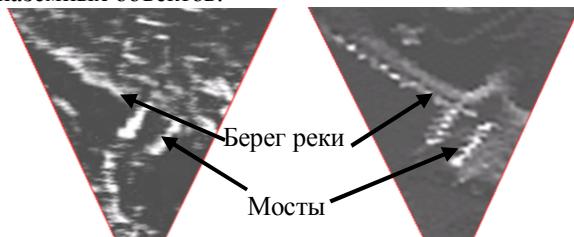


Рисунок 5

Перспективным представляется не только поиск реперных точек для автономной навигации, но и выделение новых, не отмеченных на карте, объектов (целей). Отметим, что в известных методиках радиолокационного обнаружения наземных целей предполагается либо их радиоконтрастность, либо подвижность, что даёт возможность использовать хорошо разработанные методы доплеровской фильтрации. Однако обнаружение наземного неподвижного слабоконтрастного объекта затруднено. Предлагаемое в диссертационной работе решение состоит в сопоставлении модельного и реального радиолокационных изображений для выявления новых объектов, которые отсутствуют на цифровой топографической карте местности. Для объективной оценки эффективности обнаружения наземных объектов при помощи предложенной методики было вычислено отношение μ сигнал-фон, которое является определяющим при обнаружении целей на фоне отражений от подстилающей поверхности:

$$\mu = 10 \lg(P_s/P_b), \quad (28)$$

где P_b — усредненная мощность радиоотражений от подстилающей поверхности (фона), P_s — мощность в элементе разрешения, соответствующего положению объекта (цели) на поверхности.

Выигрыш предложенного метода оценен посредством сопоставления достигаемого при его использовании отношения μ_1 сигнал-фон (28) с аналогичной величиной μ_2 для классического метода, в качестве которого был использован метод вычитания усредненной мощности предыдущего и последующего элементов разрешения РЛС из мощности анализируемого элемента разрешения. Установлено, что для пересечённой местности выигрыш $(\mu_1 - \mu_2)$ составляет 3...8 дБ, а для гористого рельефа $(\mu_1 - \mu_2) > 10$ дБ. Таким образом, показана принципиальная возможность выявления новых неподвижных наземных объектов путем

сопоставления реальных отражений от рельефа Земли и модельных портретов эхо-сигналов от лоцируемой поверхности.

Теоретические результаты, которые изложены в предыдущих главах, нашли воплощение в радиотехнических системах и устройствах, часть из которых рассматривается в заключительном седьмом разделе.

В седьмой главе диссертации рассмотрены вопросы аппаратно-программной реализации результатов диссертационной работы, приведены примеры созданных и модифицированных радиотехнических систем и устройств, разработанных алгоритмов и компьютерных программ для цифровой обработки радиотехнических сигналов, базирующейся на их параметрическом моделях.

Цель седьмой главы — рассмотрение результатов практической реализации в различных прикладных областях разработанных в диссертации методов и алгоритмов обработки радиотехнических сигналов, основанных на их параметрических моделях.

Затронуты вопросы, касающиеся специфики использования полученных теоретических результатов, относящихся к конкретным прикладным областям. Показано, что теоретические обобщения, сделанные в диссертационной работе, дают возможность применения созданных процедур цифровой обработки сигналов в радиотехнических системах и устройствах, которые входят в состав различных аппаратных средств, работающих в разнообразных технических сферах (технической и медицинской диагностики, дистанционного мониторинга объектов и природных сред, автономной и спутниковой навигации). Приводятся примеры решений следующих научно-технических задач:

- селекции и оценивания;
- обнаружения и измерения;
- пространственной и географической ориентации.

Перечисленные задачи решены на практике при помощи созданных аппаратных и программных средств, входящих в состав:

— приборов автоматической селекции однофазных замыканий на землю в высоковольтных кабельных сетях 6...10 кВ (прибор АСЗ-5М экспонировался в ноябре 1999 года на Всероссийском выставочном центре (ВВЦ) в павильоне «Энергосбережение» бывшего ВДНХ и находится в эксплуатации на подстанциях «Рязаньэнерго» ОАО «МРСК Центра и Приволжья»);

— медицинских диагностических систем «Ритм» и «SunY» неинвазивного (не требующего исследования биологических жидкостей) анализа состояния здоровья человека (медицинские системы находятся в эксплуатации в виде учебно-лабораторного оборудования вузов Рязани и Калуги);

– оптических измерителей нижней границы облачности (использованы при создании опытного образца прибора ЛИНГОМ-1, созданного ВЭИ им. В.В. Ленина в 2005 г.);

– лазерных систем мониторинга атмосферы и гидросферы (создан прошедший натурные испытания лидарный комплекс в интересах Управления природопользования Рязанской области в 2007 г.);

– устройств лазерной диагностики поверхностей качения колёсных пар на железнодорожном транспорте (внедрены в установку «Профиль-Кон», созданную ООО «Агроэл» и находящуюся в промышленной эксплуатации в депо и ремонтных заводах ОАО «РЖД»);

– средств обработки радиолокационной информации (программные средства экспонировались на ВВЦ в 2001 г.; внедрены в разработки Корпорации «Фазотрон-НИИР» и НИИ «Рассвет»);

– систем автономной инерциальной навигации летательных аппаратов (внедрены в разработки ЗАО «Авиаприбор», прошли испытания в ЦАГИ);

– бортовых навигационных комплексов (проведена серия натуральных экспериментов по автономной навигации летательных аппаратов для разработок Государственного рязанского приборного завода).

В седьмой главе показано, что предлагаемые в диссертации методы и алгоритмы обработки радиотехнических сигналов успешно использованы при практической реализации устройств и систем, предназначенных для эксплуатации в различных прикладных областях и созданных для решения ряда научно-технических задач.

Задачи обнаружения представлены выявлением факта радиолокационного облучения самоприцеливающихся боеприпасов для своевременных упреждающих мер противодействия со стороны обороняющихся объектов. Решалась проблема поиска подводных аномалий при помощи лидара, осуществляющего зондирование водных бассейнов, а также раннего обнаружения лесных пожаров при помощи лазерного зондирования атмосферы над лесными массивами. Созданы средства выделения новых, не внесённых в электронную карту местности, неподвижных наземных объектов, радиоотражения от которых поступают на фоне мешающих эхосигналов от подстилающей поверхности.

Задачи диагностики представлены работами в области медицины по оценке состояния человека по пульсу, технической диагностики высоковольтных кабельных линий 6-10 кВ на предмет наличия повреждений изоляции, провоцирующих однофазные замыкания на землю, а также лазерных исследований поверхностей качения колёс железнодорожного транспорта для выявления их пригодности к дальнейшей эксплуатации.

Задачи измерения включают технические решения, реализующие определение нижней границы облачности путём лазерного зондирования атмосферы, а также замер текущей оптической видимости у земли для обеспечения безопасной посадки летательных аппаратов. Созданы средства измерения частоты вращения космических объектов по их наблюдениями с Земли в различных поддиапазонах оптической части спектра.

Решались вопросы **комплексирования** наблюдений, полученных от различных датчиков и/или лежащих в различных диапазонах электромагнитного спектра. В частности созданы средства совместной обработки навигационной информации, поступающей как от серии инерциальных датчиков (акселерометров, гироскопов, магнетометров), так и от разных систем спутниковой навигации (ГЛОНАСС, GPS). Проводились работы по комплексному анализу лежащих в различных частях оптического спектра изображений космических аппаратов с целью дистанционной диагностики их технического состояния в интересах МАК «Вымпел».

В настоящее время ведутся работы по комплексированию радиолокационных и телевизионных (в видимом и инфракрасном диапазонах) наблюдений с борта летательного аппарата.

В заключении подводятся итоги проведённых в диссертационной работе исследований и намечаются перспективы их развития. Указывается значение диссертации в теории и практике создания новых и совершенствования существующих радиотехнических систем различного назначения. Отмечается, в частности, что одним из направлений развития проведённых исследований является углубление теоретических обобщений векторного аппарата параметрического моделирования (VAR-, VARMA-моделей) при учёте априорных сведений о моделируемых и обрабатываемых радиотехнических сигналах. Есть основания считать, что найденные в диссертации пути решения задач селекции и оценивания; обнаружения и измерения; пространственной ориентации и определения географических координат могут быть обобщены на более широкие области, в которых используются радиотехнические системы с цифровой обработкой сигналов. К числу таких областей можно отнести акустическую локацию, радиосвязь, радиоэлектронную борьбу и пр. В частности, проводились исследования, посвященные возможности использования изложенных подходов для синтеза систем акустического зондирования жидкостей для измерения скорости их потоков.

В приложениях приведены результаты испытаний и экспериментов, списки условных обозначений, терминов, сокращений и аббревиатур, а также копии актов о внедрении результатов, полученных в ходе работы над диссертацией, в разработки предприятий и государственных учреждений.

Выводы

Таким образом, **достигнута цель диссертации** — решён комплекс научно-технических задач, имеющих важное народнохозяйственное значение и состоящих в увеличении эффективности функционирования радиотехнических систем и устройств, а именно в повышении их точности и разрешающей способности в задачах обнаружения, селекции и измерения параметров радиотехнических сигналов.

Теоретические расчёты, имитационное моделирование, натурные и полунатурные испытания, а также практическая эксплуатация ряда созданных средств обработки радиотехнических сигналов показали, что выигрыш от применения найденных подходов к решению перечисленных научно-технических задач составляет по введённым критериям (1), (2), (12), (25), (27) величину от 30 до 300 %. Это доказывает практическую целесообразность использования результатов диссертационной работы в различных прикладных областях. К их числу относятся не только техническая и медицинская диагностика, электроэнергетика, радио-, тепло- и светолокация, но и астрономия, экологический и медицинский мониторинг.

Работы по расширению сфер применения итогов диссертационных исследований ведутся в Научно-образовательном центре технологии обработки радиолокационных и навигационных сигналов (научный руководитель — проф. В.И. Кошелев, директор — доц. В.Г. Андреев) молодыми учёными, аспирантами, магистрантами и студентами Рязанского государственного радиотехнического университета. Под руководством В.Г. Андреева успешно защищены 4 диссертации на соискание учёной степени канд. техн. наук российскими и зарубежными гражданами. В настоящее время В.Г. Андреев руководит шестью аспирантами.

Основные результаты диссертации опубликованы в более чем 180-ти научных работах. Ниже приведен библиографический список наиболее значимых из них.

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

1. Кошелев В.И., Андреев В.Г. Синтез АРСС—моделей эхо-сигналов // Изв. вузов. Радиоэлектроника.— 1993.— №7.— С. 8-13.
2. Кошелев В.И., Андреев В.Г. Адаптивное подавление многокомпонентных помех // Изв. вузов. Радиоэлектроника.— 1994.— №4.— С. 14-19.
3. Бакулев П.А., Кошелев В.И., Андреев В.Г. Оптимизация АРСС—

моделирования эхо-сигналов // Изв. вузов. Радиоэлектроника.— 1994.— №9.— С. 3-8.

4. Кошелев В.И., Андреев В.Г. Оптимизация AP—моделей процессов с полимодальным спектром // Изв. вузов. Радиоэлектроника.— 1996.— №5.— С. 43-48.

5. Кошелев В.И., Андреев В.Г. Оптимизация APCC—моделей многокомпонентных радиоотражений // Вестник Рязанской гос. радиотехнической академии. Вып. 2.— Рязань, 1997.— С. 38-41.

6. Кошелев В.И., Андреев В.Г., Пальчик О.В. Компенсация ошибок определения коэффициентов моделирующих APCC-фильтров // Изв. вузов. Радиоэлектроника.— 2001.— Т.44.— №7.— С. 50-55.

7. Кошелев В.И., Логинов С.Н., Андреев В.Г. Алгоритмы и средства спектрального анализа сигналов с большим динамическим диапазоном // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Радиолокационная техника.— 2002.— Вып. 1-2.— С. 77-89.

8. Андреев В.Г., Воскресенский А.В. Оптимизация коэффициентов авторегрессионных фильтров обработки и моделирования сигналов конечной длительности // Изв. вузов. Радиоэлектроника.— 2003.— Т. 46.— №2.— С. 76-80.

9. Пальчик О.В., Андреев В.Г. Статистический анализ диагностических сигналов при контроле тормозных систем на железнодорожном транспорте // Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии. Выпуск 13.— Рязань, 2003.— С. 114-117.

10. Андреев В.Г., Пальчик О.В. Повышение точности измерения геометрических параметров движущихся объектов методом лазерной триангуляции // Датчики и системы.— 2004.— № 9.— С. 6-9.

11. Андреев В.Г., Пальчик О.В. Моделирование сигнала с фотоприемника лазерного триангуляционного измерителя // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика.— 2005.— № 1.— С. 34-37.

12. Андреев В.Г., Пальчик О.В. Анализ эффективности математического моделирования лазерных триангуляционных измерителей // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика.— 2005.— № 2.— С. 32-35.

13. Андреев В.Г., Пальчик О.В. Метод нахождения энергетического центра одиночного импульса // Известия вузов. Радиоэлектроника.— 2005.— Т. 48.— № 7.— С. 47-55.

14. Андреев В.Г., Нгуен Ш.В. Оптимизация фильтров моделирования мешающих радиоотражений для исследования систем первичной обработки эхо-сигналов // Изв. вузов. Радиоэлектроника.— 2006.— Т. 49.— № 10.— С. 69-76.

15. Андреев В.Г., Нгуен Ш.В. Параметрическое моделирование коррелированных радиоотражений для анализа эффективности обработки эхо-сигналов // Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии. Выпуск 18.— Рязань: РГРТА, 2006.— С. 40-45.

16. Андреев В.Г. Линейно-ограниченные регрессионные модели локационных сигналов // Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии. Выпуск 19.— Рязань: РГРТА, 2006.— С. 62-65.

17. Андреев В.Г., Конкин Ю.В., Юкин С.А. Методика формирования радиолокационных эталонов для систем навигации летательных аппаратов //

Проектирование и технология электронных средств.— 2007.— № 2.— С. 39-44.

18. Андреев В.Г. Оптимизация авторегрессионных моделей мешающих радиоотражений // Изв. вузов. Радиоэлектроника.— 2008.— Т. 51.— №7.— С. 40-47.

19. Андреев В.Г. Метод построения моделей сигналов с заданными амплитудно-фазовыми портретами // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета.— № 1.— Выпуск 31.— Рязань: РГРТУ, 2010.— С. 12-15.

20. Андреев В.Г. Векторный регрессионный спектральный анализ отражений от вращающегося объекта // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета.— № 2.— Выпуск 32.— Рязань: РГРТУ, 2010.— С. 43-48.

21. Андреев В.Г., Кирьяков А.А. Векторный анализ процессов регуляции физиологических функций человека // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета.— № 4.— Выпуск 34.— Рязань: РГРТУ, 2010.— С. 19-24.

22. Андреев В.Г., Назаркин М.Д. Методика моделирования радиоотражений от земной поверхности по цифровой карте местности // Вопросы радиоэлектроники. Серия «Радиолокационная техника».— Выпуск 3.— 2010.— С. 58-65.

23. Андреев В.Г. Оптимизация авторегрессионных моделей радиоотражений // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета.— № 1.— Выпуск 35.— Рязань: РГРТУ, 2011.— С. 12-15.

24. Андреев В.Г., Белокуров В.А. Метод повышения точности начальной выставки бесплатформенных навигационных систем // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета.— №2.— Выпуск 36.— Рязань: РГРТУ, 2011.— С. 28-33.

25. Андреев В.Г. Метод обнаружения сигналов от непрерывно излучающих вращающихся объектов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета.— № 3.— Выпуск 37.— Рязань: РГРТУ, 2011.— С. 23-26.

26. Андреев В.Г. Векторный регрессионный спектральный анализ много-частотных отражений от вращающегося объекта // Вопросы радиоэлектроники. Серия «Радиолокационная техника».— Выпуск 1.— 2011.— С. 63-72.

27. Андреев В.Г. Линейно ограниченные авторегрессионные модели узкополосных сигналов радиотехнических систем // Проектирование и технология электронных средств.— 2011.— № 1.— С. 2-6.

28. Андреев В.Г. Оптимизация моделей многомерных сигналов спутниковых навигационных систем // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета.— № 2.— Выпуск 40.— Рязань: РГРТУ, 2012.— С. 30-34.

29. Андреев В.Г., Белокуров В.А., Кошелев В.И. Когерентно-некогерентное накопление слабых радиотехнических сигналов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета.— № 4.— Выпуск 42.— Рязань: РГРТУ, 2012.— С. 18-21.

30. Андреев В.Г., Белокуров В.А. Моделирование магнитометрических сигналов бесплатформенных инерциальных навигационных систем // Вестник

Рязанского государственного радиотехнического университета.— № 1.— Выпуск 43.— Рязань: РГРТУ, 2013.— С. 45-49.

31. Андреев В.Г., Белокуров В.А., Кошелев В.И. Снижение погрешности угловой ориентации бесплатформенных навигационных систем, вызванной дрейфом микромеханических гироскопов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета.— № 2.— Выпуск 44.— Рязань: РГРТУ, 2013.— С. 27-31.

Тезисы и материалы докладов

32. Кошелев В.И., Андреев В.Г. Исследование алгоритмов адаптивного выделения сигналов со спектральной оценкой параметров помех // Компьютерные методы исследования проблем теории и техники передачи дискретных сигналов по радиоканалам: тез. докл. Всесоюзной научно-техн. конференции, г. Евпатория, 3-5 сентября 1990 г.— М.: Радио и связь, 1990.— С. 128-129.

33. Кошелев В.И., Андреев В.Г. Построение контрольного спектра при моделировании радиоотражений // Методы и средства радиои импульсного зондирования среды: труды межрегионального семинара, г. Рига, 13-15 октября 1992 г.— Рига: EDI RIN, 1992.— С. 32-34.

34. Кошелев В.И., Андреев В.Г. Оптимизация АРСС—моделирования информационных сигналов // Технологии и системы сбора, обработки и представления информации: тез. докл. Международной научно-техн. конференции, г. Рязань, 15-18 сентября 1993 г.— Рязань: Русское слово, 1993.— С. 70-71.

35. Кошелев В.И., Андреев В.Г. Стохастическое моделирование полимодальных радиоотражений // Теория и техника передачи, приема и обработки сигналов: тезисы докладов Международной научной конференции, г. Туапсе, 18-21 сентября 1995 г.— Туапсе: Изд-во ХТУРЭ, 1995.— С. 10.

36. Koshelev Vitaly I., Andrejev Vladimir G. Building of the Control ARMA—spectrum for a Modeling of Echo-signals // 5-th International Symposium on Recent Advances in Microwave Technology Digest.— Kiev, 11-16 September 1995.— Kiev, Ukraine, 1995.— P. 613-617.

37. Кошелев В.И., Первенцев М.А., Андреев В.Г. Система селекции однофазных замыканий в высоковольтных кабельных сетях // Микропроцессорные системы автоматики: материалы III Международной конференции, г. Новосибирск, 19-24 февраля 1996 г.— Новосибирск: НГТУ, 1996.— С. 109-110.

38. Кошелев В.И., Андреев В.Г. Авторегрессионное моделирование токов нулевой последовательности // Теория и техника передачи, приема и обработки информации: тезисы докладов III Международной конференции.— Харьков, 1997.— С. 362-363.

39. Кошелев В.И., Андреев В.Г. Цифровой спектральный анализ радиолокационных сигналов // Цифровая обработка сигналов и ее применения: материалы докладов I Международной конференции.— М., 1998.— Т. III.— С. 9-12.

40. Koshelev Vitaly I., Andrejev Vladimir G. Digital Spectral Analysis of the Radar signals // Digital signals processing and its applications: Proceedings.— Moscow, 1998.— V. III-E.— PP. 5-8.

41. Koshelev Vitaly I., Andrejev Vladimir G. Spectral Analysis of the Short

Cardiac Pulse Sequences // Digital signals processing and its applications: Proceedings.— Moscow, 1998.— V. VI-E.— PP. 146-149.

42. Кошелев В.И., Андреев В.Г. Сокращение избыточности статистического описания случайных процессов с частично известными спектральными свойствами // Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики, экономики и права: Научные труды II Международной научно-практической конференции.— М.: МГАПИ, 1999.— С. 79-82.

43. Koshelev V.I., Andrejev V.G. The Modified Algorithm of AR—modeling of Narrow—Band Processes // Digital signals processing and its applications: Proceedings.— Moscow, 1999.— V. III.— PP. 706-707.

44. Кошелев В.И., Андреев В.Г. Кардиоинтервалографический комплекс компьютерной диагностики состояния здоровья // Измерение, контроль, информатизация: материалы Второй Международной научно-технической конференции / Под. ред. А.Г. Якунина.— Барнаул: АГТУ, 2001.— С. 185-186.

45. Кошелев В.И., Логинов С.Н., Андреев В.Г. Синтез бортовой РЛС в условиях интенсивных отражений от подстилающей поверхности // Радиолокация, навигация, связь: материалы докладов VII Международной научно-технической конференции.— Воронеж: Изд-во ВГУ, 2001.— С. 1368-1374.

46. Koshelev Vitaly I., Andrejev Vladimir G., Voskresensky Aleksey V. The Modified Procedure Analysis of the Cardiac Pulse Sequences // The IEEE — Siberian Conference of Students, Post-graduate Students and Young Scientists on Electron Devices and Materials (SIBEDEM-2002). Proceedings.— Tomsk: The Tomsk IEEE Chapter & Student Branch. Russia, March 19-20, 2002.— PP. 61-62.— (IEEE Catalog Number: 02EX529; ISBN: 0-7803-7274-3).

47. Andrejev Vladimir G., Palchik Oleg V. Data processing of the triangulable measuring instruments // Digital signal processing and it's application: VI International Conference and exhibition.— Moscow, 2004.— V. II.— PP. 197-200.

48. Нгуен Ш.В., Андреев В.Г. Оптимизация фильтров моделирования радиоотражений для анализа эффективности обработки эхо-сигналов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двенадцатая Международная научно-техн. конф.: тез. докл. В 3 т.— М.: МЭИ, 2006.— Т. 1.— С. 85-86.

49. Андреев В.Г., Юкин С.А. Методика моделирования радиоизображений подстилающей поверхности при наличии радиолокационных теней // Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации; вып. 2: труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова / РНТОРЭС им. А.С. Попова, Ин-т радиотехники и электроники РАН, Рос. Секция IEEE.— М., 2007.— С. 187-191.

50. Андреев В.Г., Назаркин М.Д. Авторегрессионное моделирование эхо-сигналов в задачах диагностики радиолокационной аппаратуры // Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации; вып. 2: 2-я Международная конференция / РНТОРЭС им. А.С. Попова, Ин-т радиотехники и электроники РАН, Рос. Секция IEEE.— М., 2007.— С. 185-187.

51. Кошелев В.И., Андреев В.Г. Моделирование радиотехнических сигналов с учетом их фазовых портретов // Цифровая обработка сигналов и ее применение — DSPA 2008: тез. докл. X Междунар. конференции и выставки.— № X-1.— М.: Институт проблем управления РАН, 2008.— С. 418-420.

52. Андреев В.Г., Юкин С.А. Математическое моделирование радиолокационных эталонов в системах навигационного обеспечения // Физика и технические приложения волновых процессов: тез. докл. VII Междунар. научно-техн. конф., посвященной 150-летию со дня рождения А.С. Попова.— Самара: Книга, 2008.— С. 61-62.

53. Андреев В.Г., Юкин С.А. Формирование радиолокационного изображения поверхности в передней полусфере при маловысотном полете // тезисы докладов Международной научно-технической конференции к 100-летию со дня рождения В.А. Котельникова.— М.: Издательский дом МЭИ, 2008.— С. 162-164.

54. Андреев В.Г. Моделирование радиоотражений от земной поверхности по цифровой карте местности // Цифровая обработка сигналов и ее применение — DSPA 2009: тез. докл. 11 Междунар. конференции и выставки.—Т. 2.— М.: Институт проблем управления РАН, 2009.— С. 328-331.

55. Андреев В.Г., Кошелев В.И. Моделирование радиоизображений поверхности земли по цифровой карте местности // Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации; вып. 3: 3-я Международная конференция / РНТОРЭС им. А.С. Попова, Рос. Секция IEEE.— М., 2009.— С. 146-149.

56. Андреев В.Г. Векторный регрессионный спектральный анализ много-частотных отражений от вращающегося объекта // Радиолокационная техника: устройства, станции, системы: тез. докл. Второй Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 35-летию отдела новых разработок Муромского завода радиоизмерительных приборов.— Муром: Изд-во Владимирского гос. университета, 2010.— С. 40-41.

57. Signal filtration for rate gyro units / V.G. Andrejev, V.A. Belokurov, V.I. Galkin etc. // 17th Saint Petersburg International conference on integrated navigation systems: Proceedings // Saint Petersburg: Concern CSRI Electropribor, 2010.— P.52-53.

58. Андреев В.Г. Обработка цветного изображения вращающегося объекта // Современные телевидение и радиоэлектроника: труды 19-й Междунар. научно-техн. конференции.— М.: ФГУП МКБ «Электрон», 2011.— С. 252-253.

59. Signal filtration inertial measurement units for advance accuracy attitude / V.G. Andrejev, V.A. Belokurov, V.I. Galkin etc. // 18th Saint Petersburg International conference on integrated navigation systems: Proceedings / Saint Petersburg: Concern CSRI Electropribor, 2011.— P. 97-98.

60. Андреев В.Г., Белокуров В.А., Кошелев В.И. Начальная выставка бесплатформенных навигационных систем с компенсацией вибраций носителя // XIX Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам, 28-30 мая 2012 г.— Санкт-Петербург: Электроприбор, 2012.— С. 101-104.

61. Андреев В.Г. Оценки параметров векторной авторегрессии по экспериментальным навигационным данным // Современные телевидение и радиоэлектроника: труды 20-й Междунар. научно-техн. конференции, Москва, Россия, 20-21 марта 2012 г.— М.: ФГУП МКБ «Электрон», 2012.— 366 с.— С. 257-259.

62. Кошелев В.И., Андреев В.Г., Белокуров В.А. К-этапное межпачечное

обнаружение малоразмерной цели // Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации: материалы 5-й Междунар. научно-техн. конференции ARMIMP-2012 / РНТОРЭС им. А.С. Попова.— М.-Суздаль, 2012.— С. 103-104.

63. Андреев В.Г., Белокуров В.А. Оптимизация векторных моделей цветных изображений вращающихся объектов // Современные телевидение и радиоэлектроника: труды 21-й Междунар. научно-техн. конференции, Москва, Россия, 19-20 марта 2013 г.— М.: ФГУП МКБ «Электрон», 2013.— 338 с.— С. 119-121.

64. Андреев В.Г., Белокуров В.А., Кошелев В.И. Повышение точности измерения дальности до цели при межпачечном накоплении радиотражений // Цифровая обработка сигналов и её применение — DSPA 2013: тез. докл. 15-й Междунар. конференции.— Т. 1.— М.: Институт проблем управления РАН, 2013.— С. 295-296.

65. Андреев В.Г., Белокуров В.А. Векторная обработка навигационных и локационных сигналов // Теория и практика современной науки: материалы IX Междунар. научно-практич. конф., г. Москва, 26-27 марта 2013 г. В 2 т. / НИИЦ «Институт Стратегических Исследований».— М.: Спецкнига, 2013.— Т. 1.— С. 58-59.

66. Андреев В.Г., Фролов Д.А., Белокуров В.А. Применение переопределённых авторегрессионных моделей для моделирования дрейфа микромеханических гироскопов в бесплатформенных курсогировертикалях: материалы доклада XV конференции «Навигация и управление движением» // Гироскопия и навигация.— 2013.— № 2.— С. 133.

67. Кошелев В.И., Андреев В.Г., Белокуров В.А. Выбор порога обнаружения при межпачечном накоплении сигнала // Перспективные технологии в средствах передачи информации (ПТСПИ-2013): тез. докл. X Междунар. конференции.— Т. 1.— Владимир: ВлГУ, 2013.— С. 169-171.

Патенты

68. Устройство подавления многокомпонентных помех: патент № 2064190 Российской Федерации, МКИ5 G01S 7/36.— Заявл. 15.06.93, № 93031276 / Кошелев В.И., Андреев В.Г. // Оpubл. 20.07.96 в Бюл. № 20.

69. Селективное устройство для определения однофазных замыканий в кабельных линиях: патент № 2217769 Российской Федерации МКИ5 G01R 31/02, 31/08.— Заявл. 29.03.2002, № 2002108087 / В.И. Кошелев, В.Г. Андреев, А.В. Воскресенский, Д.А. Дубов // Оpubл. 27.11.03 в Бюл. № 33.

70. Способ диагностирования сердечнососудистой системы: патент № 2442529 Российской Федерации МПК7 А61В5/0295, А61В5/0452.— Заявл. 02.07.2010, № 2010127374/14 / В.И. Кошелев, В.Г. Андреев, А.А. Кирьяков, Е.В. Коновалов // Оpubл. 20.02.12.

Соискатель



В.Г. Андреев

А н д р е в Владимир Григорьевич

Оптимизация алгоритмов и устройств обработки радиотехнических сигналов
на основе параметрических моделей

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Подписано в печать _____.____.2013. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 2,0.

Уч.-изд. л. 2,0. Тираж 100 экз. Заказ _____

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ