

На правах рукописи

**БАГДАГЮЛЯН Александр Альбертович**

**АЛГОРИТМЫ ОЦЕНКИ ЧАСТОТЫ СИГНАЛА БИЕНИЙ НА ОСНОВЕ  
МЕТОДОВ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА  
ДЛЯ ДАЛЬНОМЕРОВ С ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ  
ЗОНДИРУЮЩЕГО СИГНАЛА**

Специальности 05.12.04 - "Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения", 05.12.14 - «Радиолокация и радионавигация»

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Рязань 2007

Работа выполнена на кафедре радиоуправления и связи ГОУВПО  
«Рязанский государственный радиотехнический университет»

**Научный руководитель:** кандидат технических наук, доцент  
Паршин Валерий Степанович

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, доцент  
Ключко Владимир Константинович,  
  
доктор технических наук, профессор  
Смольский Сергей Михайлович.

**Ведущая организация:** ОАО «Корпорация Фазотрон - НИИР»  
НИИ «Рассвет»,  
390044, г. Рязань, ул. Костычева, 15.

Защита состоится 28 июня 2007 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д212.211.04 в Рязанском государственном радиотехническом университете по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба присылать по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1, диссертационный совет РГРТУ Д212.211.04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «РГРТУ».

Автореферат разослан 24 мая 2007 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент

А.Г. Борисов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Одной из наиболее часто встречающихся задач в радиотехнических системах является задача оценки частоты узкополосных сигналов. Существенным фактором, ограничивающим точность измерения, является наличие помех в оцениваемом диапазоне частот. Такого рода помехи встречаются при измерении частоты сигнала биений (СБ), получаемого на выходе приемника радиоволнового дальномера с частотной модуляцией (РДЧМ), применяемого в радиотехнических системах контроля и управления. Причиной их возникновения являются мешающие отражения (МО), возникающие из-за элементов конструкции, неоднородностей антенно-фидерного тракта, взаимодействия эхосигналов в смесителе приемника с образованием «виртуальных отражателей» и др. Задача оценки частоты СБ, однозначно связанной с дальностью до отражающей поверхности, при наличии МО остается одной из востребованных задач как в чисто теоретическом плане, так и в практических приложениях.

Для решения задачи измерения частоты при наличии МО можно предложить различные методы: компенсацию МО; многопараметрическую оптимизацию; параметрический спектральный анализ (ПСА) и др. Наиболее целесообразный путь решения этой задачи видится в разработке алгоритмов на основе методов ПСА. Основные достижения теории ПСА изложены в книгах Марпла С.Л.-мл., Шахтарина Б.И., Ковригина В.А. и др. Однако применение методов ПСА в том виде, в котором они известны в литературе, для измерения при наличии МО не представляется возможным. Поэтому возникает задача модифицирования и адаптации данных методов к условиям, которые имеют место на практике. При этом стоит отметить, что методы ПСА наиболее эффективны в сочетании со спектральным анализом в базисе Фурье.

В связи с этим необходимо решить задачу выбора среди известных и наиболее часто применяемых алгоритмов оценки частоты, использующих спектр в базисе Фурье, такого, который был бы наиболее устойчив к искажениям, характерным для РДЧМ, и прост в реализации. Выбор осложняется тем, что для большинства предлагаемых алгоритмов в известной литературе приводится лишь анализ методической погрешности при отсутствии шума. Для некоторых из них проведено исследование статистических характеристик оценок частоты сигналов, принимаемых на фоне нормального стационарного шума, однако данный анализ проведен при различных условиях (в том числе и различных методиках введения шума). Поэтому возникает необходимость в проведении анализа алгоритмов измерения частоты, наиболее часто применяемых на практике, с учетом единой методологии введения шума, искажений, характерных для РДЧМ, таких как паразитная амплитудная модуляция, нелинейность закона изменения частоты передатчика и фазовые шумы.

Необходимо отметить, что создание современных РДЧМ базируется на фундаментальных исследованиях по теоретической радиотехнике, что отражено в работах таких известных ученых, как Гоноровский И.С., Коровин Ю.К., Винницкий А.А., Сайбель А.Г. и многих других авторов. Развитию теории применения РДЧМ в радиотехнических системах различного назначения посвящены работы Смольского С.М., Комарова И.В., Езерского В.В., Кагаленко Б.В., Brumbi

Д. и др. Среди последних работ в данном направлении можно отметить монографию Комарова И.В. и Смольского С.М., учебник для вузов Бакулева П.А., докторскую диссертацию Езерского В.В.

**Цель работы.** Разработка алгоритмов, использующих методы параметрического спектрального анализа, позволяющие повысить точность измерения частоты сигнала биений радиоволнового дальномера с частотной модуляцией при наличии мешающих отражений.

#### **Достижение цели предполагает решение следующих задач**

1. Анализ СБ при наличии МО, паразитной амплитудной модуляции, нелинейной зависимости частоты передатчика РДЧМ от времени и фазовых шумов.
2. Разработка алгоритма оценки частоты, производящего обработку СБ на 2-х полупериодах модуляции частоты, в интересах повышения точности измерения дальности.
3. Исследование влияния искажений, характерных для РДЧМ, на точность оценки частоты СБ с помощью алгоритмов, использующих спектр в базисе Фурье.
4. Разработка алгоритмов оценки частоты на основе метода наименьших квадратов Прони и его модификации, использующего итерационный метод Штейнлица - МакБрайда.
5. Разработка процедуры, позволяющей исключить аномальные ошибки измерения частоты с помощью алгоритма на основе метода наименьших квадратов Прони.
6. Разработка алгоритмов измерения частоты на основе итерационного метода Штейнлица - МакБрайда и метода оценивания частоты, осуществляющего анализ собственных значений модифицированной ковариационной матрицы (метод EV).
7. Проверка разработанных алгоритмов на реальных образцах РДЧМ, работающих в сложной помеховой обстановке, обусловленной наличием МО.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач использовались аппарат теории спектрального анализа сигналов, синтеза линейных систем, статистической радиотехники и радиолокации, методы математической статистики, вычислительной линейной алгебры и оптимизации. Теоретические методы сочетались с исследованиями на основе компьютерного моделирования, а также натурного эксперимента с использованием опытных и серийных РДЧМ.

#### **Научная новизна**

1. Разработаны алгоритмы на основе метода наименьших квадратов Прони и метода оценивания частоты, основанного на анализе собственных значений модифицированной ковариационной матрицы, которые позволяют производить поиск спектрального пика полезного сигнала в сложной помеховой обстановке, обусловленной наличием мешающих отражений и ложными спектральными пиками. Это обеспечивает повышение точности оценки дальности от 3 до 20 раз по сравнению с алгоритмами, использующими спектральную оценку в базисе Фурье.
2. Разработаны алгоритмы на основе итерационного метода Штейнлица - МакБрайда и модифицированного метода наименьших квадратов Прони, использующего итерационный метод Штейнлица - МакБрайда, позволяющие упростить процедуры поиска спектрального пика полезного сигнала при наличии мешающих отражений за счет отсутствия ложных спектральных пиков и повысить точ-

ность оценки дальности от 3 до 20 раз.

3. Разработан алгоритм оценки частоты, производящий обработку сигнала биений на 2-х полупериодах модуляции частоты передатчика РДЧМ, который позволяет уменьшить погрешность измерения дальности примерно на 40 %.

4. Проведено исследование влияния искажений, характерных для РДЧМ, и нестабильности его параметров на точность оценки частоты по спектру сигнала биений в базисе Фурье, что позволяет произвести выбор алгоритма, минимизирующего ошибку оценки дальности.

#### **Практическая значимость и внедрение результатов работы.**

Реализация полученных результатов позволяет повысить точность измерения дальности РДЧМ в сложной помеховой обстановке, обусловленной наличием мешающих отражений. Результаты диссертационной работы внедрены на Рязанском приборостроительном предприятии ООО «Контакт-1» в виде алгоритмов оценки частоты сигнала биений в составе опытной программной оболочки верхнего уровня РДЧМ «БАРС-351», что подтверждено соответствующим актом.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Алгоритмы на основе метода наименьших квадратов Прони и метода оценивания частоты, осуществляющего анализ собственных значений модифицированной ковариационной матрицы, которые позволяют производить поиск спектрального пика полезного сигнала в сложной помеховой обстановке, обусловленной наличием мешающих отражений и ложными спектральными пиками, что повышает точность оценки дальности от 3 до 20 раз.

2. Алгоритмы на основе итерационного метода Штейнглица - МакБрайда и модифицированного метода наименьших квадратов Прони, использующего итерационный метод Штейнглица - МакБрайда, позволяющие упростить процедуры поиска спектрального пика полезного сигнала при наличии мешающих отражений за счет отсутствия ложных спектральных пиков и повысить точность оценки дальности от 3 до 20 раз.

3. Алгоритм оценки частоты, производящий обработку сигнала биений на 2-х полупериодах модуляции частоты передатчика радиоволнового дальномера с частотной модуляцией, который позволяет уменьшить погрешность измерения дальности на 40 %.

**Апробация работы.** Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались: на 4-й Международной НТК «Измерение, контроль, информатизация», г. Барнаул, АГТАУ, 2003 г.; 6, 7, 8, 9-й Международной НТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение», РНТОРЭС им. А.С. Попова, Москва, 2004, 2005, 2006, 2007гг.; 58-й и 61-й Научных сессиях, посвященных Дню радио, РНТОРЭС им. А.С. Попова, Москва, 2003, 2006гг.; 3-й Международной НТК «Физика и технические приложения волновых процессов», Волгоград, НИ ИИД «Авторское перо», 2004 г.; 14-й Международной НТК «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций», Рязань, РГРТА, 2005 г.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 14 работ, среди которых 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК для публикаций, 1 статья в региональном научном сборнике, 9 тезисов докладов на конференциях.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии из 97 наименований, 3 приложений. Содержание работы изложено на 191 с., в том числе основного текста 144 с., 63 иллюстрации, выполненных на 33 с., 10 с. библиографии и 4 с. приложений.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель, задачи работы и положения, выносимые на защиту, охарактеризована степень разработанности проблемы, определен круг вопросов, касающихся решения поставленных задач.

**В первой главе** рассматриваются специфические особенности оценки частоты СБ, возникающие при измерении дальности до уровня материала в замкнутых резервуарах с помощью РДЧМ. Проведён анализ СБ, в том числе при наличии МО, и искажений, характерных для РДЧМ. Сигнал биений для симметричного пилообразного закона модуляции частоты при наличии МО можно записать как

$$s(t) = S_c \cos(\omega_p t + \varphi_n) + \sum_{i=1}^N S_{m_i} \cos(\Omega_{m_i} t + \varphi_{m_i}) + S_c \sum_{i=1}^N S_{m_i} \cos((\omega_p - \Omega_{m_i})t + \varphi_n - \varphi_{m_i}) + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N S_{m_i} S_{m_j} \cos[(\Omega_{m_i} - \Omega_{m_j})t + \varphi_{m_i} - \varphi_{m_j}], \quad (1)$$

где  $S_c$ ,  $\varphi_n$ ,  $\omega_p$  - амплитуда, начальная фаза и частота сигнала, отраженного от контролируемой поверхности;  $S_{m_i}$ ,  $\varphi_{m_i}$ ,  $\Omega_{m_i}$  - амплитуды, начальные фазы и частоты сигналов, отраженных от  $i$ -го мешающего отражателя;  $N$  - количество МО. В выражении (1) при отсутствии МО будет присутствовать только первое слагаемое, то есть частота и начальная фаза полезного сигнала имеют вид

$$\omega_p = 4\omega_\delta r / cT, \quad \varphi_n = (\omega_0 - \omega_\delta)\tau_c - \omega_\delta \tau_c^2 / T - \varphi_c, \quad (2)$$

где  $\omega_\delta$  - девиация частоты;  $T = T_m / 2$ ,  $T_m$  - период модуляции частоты сигнала;  $\tau_c$  - время задержки отраженного сигнала; дальность до уровня  $r = c\tau_c / 2$ ;  $c$  - скорость света;  $\omega_0$  - несущая частота передатчика;  $\varphi_c$  - фазовый сдвиг, обусловленный диэлектрическими свойствами отражающей поверхности и фазочастотной характеристикой приемного тракта РДЧМ. Частоты и начальные фазы для каждого МО имеют аналогичный вид с учетом расстояния до него.

Для того чтобы осуществлять измерение частоты СБ в сложной помеховой обстановке, обусловленной наличием МО, необходимо вначале произвести поиск спектрального пика, соответствующего отражениям от контролируемой поверхности, среди спектральных пиков эхо-сигналов. Мешающие отражения имеют сигналподобную структуру, что существенно усложняет процедуру идентификации среди них отражений от контролируемой поверхности. Проведен подробный анализ видов МО, их свойств, а также характера их поведения при перемещении положения контролируемой поверхности уровня материала.

**Во второй главе** проведены разработка и исследование алгоритмов, использующих спектр в базисе Фурье при отсутствии МО.

Разработан алгоритм оценки частоты, использующий СБ на 2-х полупериодах модуляции частоты (ПМЧ) передатчика РДЧМ. Запишем СБ для

дискретного времени на первом  $s_k^I$  и втором  $s_k^{II}$  ПМЧ в виде

$$s_k^I = S_c \cos(\omega_p t_k + (\omega_0 - \omega_d)\tau_c - \omega_d \tau_c^2 / T - \varphi_c), \quad k = \overline{0, K-1}; \quad (3)$$

$$s_k^{II} = S_c \cos(-\omega_p t_k + (\omega_0 + 3\omega_d)\tau_c + \omega_d \tau_c^2 / T - \varphi_c), \quad k = \overline{K, 2K-1}, \quad (4)$$

где  $t_k = k \cdot \Delta t$ ,  $\Delta t$  - интервал между отсчетами СБ,  $K$  - число отсчетов.

После операции перемножения отсчетов СБ на первом  $s_k^I$  и втором  $s_k^{II}$  ПМЧ, для чего требуется запоминание их отсчетов, поскольку они разнесены во времени, и фильтрации постоянной составляющей получим сигнал вида

$$\tilde{s}_k = 0.5 S_c \cos(2\omega_p t_k - 4\omega_d \tau_c - 2\omega_d \tau_c^2 / T), \quad k = \overline{0, K-1}, \quad (5)$$

в котором неизвестным является только частота  $\omega_p$ . Для оценки частоты  $\omega_p$  производится однопараметрическая оптимизация выражения

$$L_{\max}(\omega_p) = \max_{\omega_p} \left\{ - \sum_{i=1}^{K/2-1} |\tilde{Y}(j\omega_i) - \tilde{S}(j\omega_i, \omega_p)|^2 \right\}, \quad (6)$$

где  $\tilde{Y}(j\omega_i)$  - спектр произведения отсчетов СБ  $y_k^I = s_k^I + \xi_k^I$  и  $y_k^{II} = s_k^{II} + \xi_k^{II}$ , полученный с помощью БПФ с последующей фильтрацией составляющей на нулевой частоте;  $\xi_k^I, \xi_k^{II}$  - независимые отсчеты реализации белого шума со спектральной плотностью  $N_0$ ;  $\tilde{S}(j\omega_i, \omega_p)$  - спектр сигнала (5). Амплитуда  $S_c$  считается известной. Это ограничение не является существенным, поскольку применение инвариантного преобразования  $z'_k = z_k / \sqrt{\sum_{i=0}^{K-1} z_i^2}$  позволяет практически полностью исключить влияние на результаты измерения различия в амплитудах.

Предложенный алгоритм позволяет существенно уменьшить погрешность измерения частоты СБ по сравнению с алгоритмом, производящим ее оценку по положению максимума спектра в базисе Фурье  $G(\omega_i)$ :

$$G(\hat{\omega}_p) = \max_{\omega_i} G(\omega_i). \quad (7)$$

Выигрыш заключается в следующем: отсутствует методическая погрешность измерения, обусловленная влиянием соседних периодов спектра в базисе Фурье; уменьшается влияние шумовой помехи, так как отсутствует необходимость использования оконных функций для уменьшения методической погрешности. В результате СКО оценки дальности уменьшается примерно на 40 %. Зависимости, иллюстрирующие уменьшение погрешности измерения дальности  $r$  (частоты  $\omega_p$ ), приведены на рисунке 1. Под погрешностью измерения подразумевается величина  $\sigma_{cp} = |\varepsilon| + \sigma$ , где  $\varepsilon$  - усредненное значение методической погрешности (связанное с влиянием боковых лепестков спектра Фурье) на интервале дальности, определяющейся величиной дискретной ошибки, отнесенное к сере-

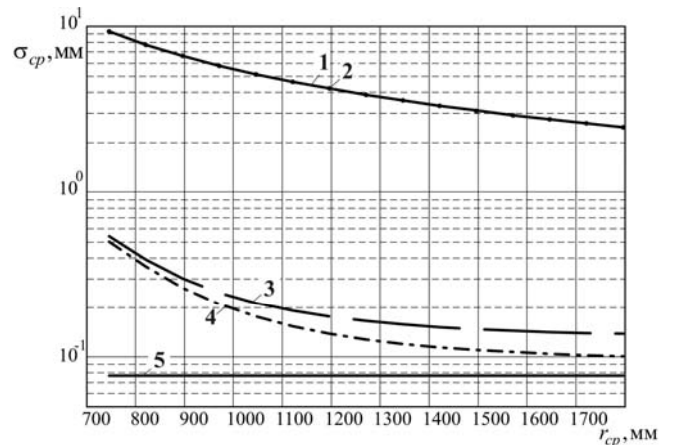


Рисунок 1 - Зависимость погрешности измерения дальности

дине данного интервала  $r_{cp}$ ,  $\sigma$  - СКО измерения дальности, обусловленная влиянием шумовой помехи. Алгоритму, осуществляющему оценку частоты  $\omega_p$  (дальности  $r$ ) согласно выражению (7), на рисунке 1 соответствуют кривые: 3, 1 - при использовании СБ на одном ПМЧ с применением оконной функции Блекмана и без неё соответственно; 4, 2 - при усреднении оценок частот, полученных по СБ на 1-м и 2-м ПМЧ с применением оконной функции Блекмана и без неё соответственно. Алгоритму, использующему СБ на 2-х ПМЧ, на рисунке 1 соответствует кривая 5.

Проведено исследование алгоритмов оценки частоты, основанных: 1) на поиске максимальной спектральной составляющей; 2) средневзвешенной оценки  $\mathcal{C}_p = \sum_{i=n_1}^{n_2} \omega_i G(\omega_i) / \sum_{i=n_1}^{n_2} G(\omega_i)$ , где  $n_1, n_2$  - соответственно нижняя и верхняя границы номеров спектральных отсчётов,  $n_1 \leq n_{max} \leq n_2$ ,  $n_{max}$  - номер максимальной спектральной составляющей; 3) медианной оценки  $\sum_{i=m_1}^{m_x} G(\omega_i) = \sum_{i=m_x}^{m_2} G(\omega_i)$ , где  $m_1, m_2$  - соответственно нижняя и верхняя границы текущих номеров спектральных отсчётов  $m_x - m_1 = m_2 - m_x$  (номер спектральной составляющей  $m_x$ , при которой достигается выполнение равенства, отождествляют с частотой СБ); 4) на использовании для уточнения оценки поправочного коэффициента, то есть  $\mathcal{C}_p = (n_{max} - 1)\Delta\omega + \rho$ , где  $\Delta\omega$  - интервал между спектральными составляющими,  $\rho$  - поправочный коэффициент, учитывающий разницу между интенсивностями максимальной и соседних с ней спектральных составляющих. Результаты моделирования позволили выявить наиболее устойчивые алгоритмы к воздействию аддитивного шума и искажений, характерных для РДЧМ.

**В третьей главе** решается задача повышения точности измерения частоты СБ при замкнутом объеме РДЧМ до уровня материала при наличии МО.

Применение алгоритмов, использующих спектр в базисе Фурье при наличии МО, не позволяет обеспечить приемлемую точность измерения частоты СБ. В качестве примера на рисунке 2 представлены зависимости погрешности измерения дальности при моделировании МО от дна резервуара. Зависимости получены с помощью алгоритма, в котором производятся поиск главного лепестка спектра Фурье, соответствующего отражениям от уровня материала, и оценка частоты СБ по положению его максимума. По оси абсцисс отложено расстояние между МО (дном) и уровнем материала  $r_x$ . Кривые, приведенные на рисунке 2, получены при

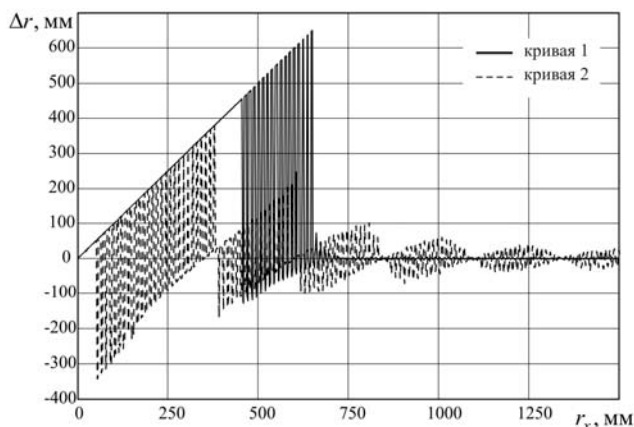


Рисунок 2 - Зависимость погрешности измерения дальности при наличии МО от дна резервуара

применении оконной функции Блекмана (кривая 1) и без неё (кривая 2). Максимальное отношение сигнал-помеха составляет  $q_{c-n} \approx -12$  дБ (при удалении уровня материала от дна на элемент разрешения). При  $r_x = 2$  м интенсивности отражений от уровня и дна резервуара имеют практически одинаковый уровень. Изменяющееся отношение сигнал-помеха объясняется затуханием излучаемого сигнала в слое материала.



Для уменьшения погрешности разработаны алгоритмы оценки частоты, использующие методы ПСА: метод наименьших квадратов (МНК) Прони, метод EV, модифицированный МНК (ММНК) Прони, итерационный метода Штейглица-МакБрайда (ИМШМ).

Разработка алгоритмов на основе методов ПСА связана с рядом проблем: наличие в спектре ложных спектральных пиков (ЛСП), которые в МНК Прони могут превышать по интенсивности спектральный пик полезного сигнала; низкая устойчивость спектральных оценок в ряде методов (в частности, методе EV). Устойчивость спектральной оценки определяется как отношение дисперсии оценки спектральной плотности мощности к квадрату математического ожидания этой оценки  $Q = D\{\hat{P}(f)\} / [M\{\hat{P}(f)\}]^2$ . Все эти факторы дополнительно усложняют задачу поиска спектрального пика, соответствующего отражениям от уровня материала среди МО. В работе эта задача решается одновременно двумя путями: разработкой процедур, которые позволили бы проводить поиск спектрального пика, соответствующего отражениям от уровня материала в спектрах с ЛСП и относительно невысокой устойчивостью спектральных оценок ( $Q = 2 \div 8$ ); модификацией существующих методов ПСА с целью получения спектра, в котором отсутствуют ЛСП, а спектральные оценки имеют большую устойчивость ( $Q < 1$ ). Это позволяет значительно упростить процедуру поиска полезного спектрального пика (ППСП) и повысить надежность результатов измерений. В качестве таких модификаций предложен ММНК Прони, использующий ИМШМ и метод спектрального оценивания, основанный на ИМШМ, который можно рассматривать как модификацию метода авторегрессии - скользящего среднего (АРСС).

Рассмотрим подробнее разработанные алгоритмы.

**Алгоритм, использующий МНК Прони.** Применяемый при реализации алгоритма оценки частоты МНК Прони имеет иной от классического способ организации вычислений. Он основан на методике вычисления параметров рекурсивного фильтра (РФ) МНК Прони. При такой вычислительной организации реализация первого и второго этапов МНК Прони (нахождение корней  $q_n$  характеристического полинома с коэффициентами  $a_m$ ) будет заключаться в вычислении полюсов передаточной функции (ПФ) РФ, порядок которой определяется величиной порядка модели  $p$

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \prod_{n=1}^{p-1} (z - r_n) / \prod_{n=1}^p (z - q_n) = \sum_{m=0}^{p-1} b_m z^{p-m-1} / \sum_{m=0}^p a_m z^{p-m} = \sum_{i=1}^{\infty} h_i z^{-i+1}, \quad (8)$$

где  $h_i$  - отсчеты импульсной характеристики (ИХ),  $a_0 = 1$ . При этом синтез РФ должен быть осуществлен при условии равенства нормированных отсчетов СБ то есть  $x_k = s_k / s_1$ ,  $s_1 \neq 0$   $k = \overline{1, K}$ , и отсчетов ИХ  $h_i$ ,  $i = \overline{1, K}$ . Используя полюса  $q_n$ , можно вычислить коэффициенты затухания  $\alpha_n$  и частоты  $f_n$ . На заключительном, третьем этапе необходимо вычислить вектор неизвестных комплексных амплитуд  $c$ , который даст оценки амплитуд экспонент  $A_n$  и начальных фаз синусоид  $\theta_n$ . Найти вектор  $c$  можно, разложив ПФ (8) на простые дроби. Коэффициенты разложения и будут являться искомыми комплексными амплитудами.

В МНК Прони для увеличения разрешающей способности с целью повышения точности измерения частоты  $\omega_p$  рекомендуется увеличивать порядок модели  $p$  больше требуемого его минимального значения, то есть  $p > p_{s \min} = 2M$ ,  $M = N + 1$ , что приводит к появлению в спектре ЛСП, которые под воздействием шума могут превысить по интенсивности спектральный пик полезного сигнала. Поэтому для реализации алгоритма оценки частоты, использующего МНК Прони, предложены двухэтапная ПППСП и процедура, позволяющая исключить аномальные ошибки измерения частоты СБ, возникающие вследствие ошибочного принятия ЛСП за спектральный пик полезного сигнала. Процедура поиска заключается в следующем.

**На первом** этапе осуществляется предварительная оценка дальности и диапазона дальности, внутри которого на втором этапе в спектре, полученном с помощью МНК Прони, проводятся поиск полезного спектрального пика и уточнение дальности. Предварительная оценка дальности выполняется с помощью разработанного для этого алгоритма на основе БПФ с ПППСП. На рисунках 3, 4 для более наглядного представления данного алгоритма приведены его блок-схема и вид спектра СБ при наличии МО. Для уменьшения влияния боковых лепестков и повышения надежности нахождения полезного спектрального пика применяется окно Кайзера. Измерения не проводятся в диапазоне от 0 до 1м, что позволяет исключить спектральные пики МО, возникающих от неоднородностей в антенно-фидерном тракте.

Алгоритм, использующий спектр Фурье с ПППСП имеет следующий вид.

1. Осуществляется поиск максимальной спектральной составляющей. Обозначим соответствующие ей интенсивность  $G_{\max}$  и дальность  $r_{\max}$ .
2. Если  $r_{\max} \in [1, r_{\text{дно}} - R_s]_M$ ,  $R_s = (6 \div 7)\delta_R$ , то осуществляется переход к п.3, иначе - к п.4. ( $r_{\text{дно}}$  - дальность до дна резервуара,  $\delta_R = c/4\omega_\delta$  - ошибка дискретности).
3. За оценку дальности до уровня материала принимается величина  $r_{\text{уровня}} = r_{\max}$ .
4. Проводится поиск ближайшего минимума слева от максимальной спектраль-

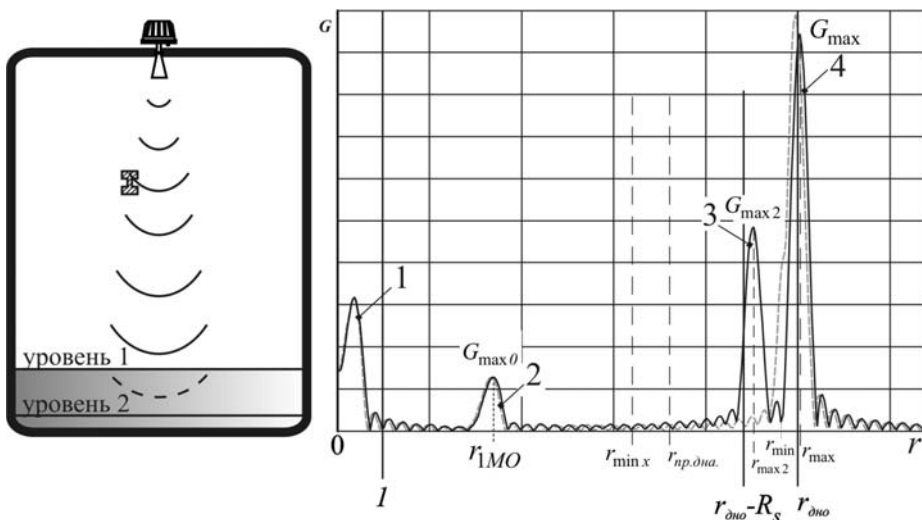


Рисунок 3 - Пример помеховой обстановки

МО, характерные: 1 - для антенно-фидерного тракта; 2 - элемента конструкции; 3 - уровня материала; 4 - дна резервуара. Кривые соответствуют положению: — уровню 1; ---- уровню 2, когда отражения от уровня и дна не разрешаются

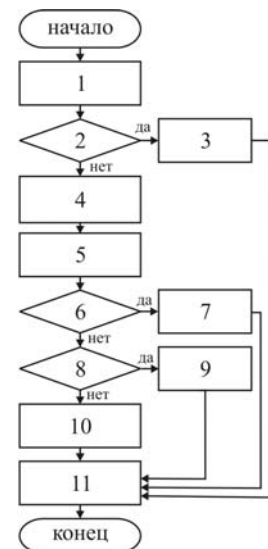


Рисунок 4

ной составляющей в диапазоне  $[r_{\min x}, r_{\text{дно}}]$ . Определяется соответствующая ей дальность  $r_{\min}$ . Величину  $r_{\min x}$  выбирают исходя из дальности до ближайшего слева от дна мешающего отражателя  $r_{1MO}$  (в случае если он присутствует, на рисунке 3 такому МО соответствует спектральный пик 2) по следующему соотношению:  $r_{1MO} < r_{\min x} < r_{\text{пр.дно}}$ , где  $r_{\text{пр.дно}}$  - дальность до уровня материала, с которой при приближении уровня ко дну интенсивность отражений от дна превышает интенсивность отражений от уровня. Как правило, данное условие на практике легко выполнить. В случае если нет МО, то  $r_{\min x} = 1\text{ м}$ .

5. Находится максимальная спектральная составляющая в диапазоне  $[r_{\min x}, r_{\min}]$ . Обозначим соответствующие ей интенсивность  $G_{\max 2}$  и дальность  $r_{\max 2}$ .

6. Если  $G_{\max 2}/G_{\max} \geq a$ , то проверяется условие, что найденный максимум  $G_{\max 2}$  на дальности  $r_{\max 2}$  больше заданного порога  $a$ . Если данное условие выполняется, то осуществляется переход к п.7, иначе - к п.8. Порог  $a$  следует выбирать из соотношения:  $G_{\max 0}/G_{\max \text{дно}} < a < G_{\max s}/G_{\max \text{дно}}$ , где  $G_{\max 0}$  - максимальная интенсивность МО, которое может быть принято в определенных случаях (если эти случаи имеют место исходя из приведенного алгоритма) за полезный сигнал;  $G_{\max \text{дно}}$ ,  $G_{\max s}$  - максимально возможные интенсивности отражений от дна резервуара и уровня материала соответственно. Если нет МО (кроме МО от дна), порог  $a$  следует выбирать исходя из уровня боковых лепестков. То есть порог выбирается насколько возможно большим, исходя из уровня МО (кроме МО от дна) и боковых лепестков, чтобы не принять их за полезный сигнал, но в то же время насколько возможно меньшим исходя из величины МО от дна  $G_{\max \text{дно}}$ , чтобы не потерять полезный сигнал.

7. За измеренное значение дальности до уровня принимается  $r_{\text{уровня}} = r_{\max 2}$ .

8. Если  $r_{\max} \leq r_{\text{дно}}$ , то осуществляется переход к п.9, иначе - к п.10.

9. За измеренное значение дальности до уровня принимается  $r_{\text{уровня}} = r_{\max}$ .

10. За измеренное значение дальности до уровня принимается  $r_{\text{уровня}} = r_{\text{дно}}$ .

11. Проводится расчет диапазона дальности  $[r_n, r_e]$ , в котором на втором этапе осуществляется уточнение дальности в спектре, полученном МНК Прони:  $r_n = \min(1, r_{\text{уровня}} - dr)$ ,  $r_e = \max(r_{\text{уровня}} + dr, r_{\text{дно}})$ ,  $dr = (1 \div 2)\delta_R$ .

**На втором** этапе осуществляются поиск и уточнение дальности с помощью спектра, полученного МНК Прони только в пределах предварительно оцененного диапазона дальностей (частот). Для этого разработан алгоритм, который учитывает наличие в спектре спектральных пиков МО и ЛСП. Процедура, позволяющая исключить аномальные ошибки измерения дальности, основана на свойстве поведения величины коэффициента затухания.

**Алгоритм на основе ММНК Прони.** ММНК Прони позволяет исключить основной недостаток МНК Прони - увеличение величины порядка модели более  $p = p_{s \min}$ . В этом случае в спектре будут отсутствовать ЛСП, что упрощает ПППСП. При этом не требуется проведения предварительных оценок дальности, а при реализации ММНК Прони необходимы на порядок меньшие вычислитель-

ные затраты, чем для МНК Прони, при условии обеспечения ими примерно одинаковой точности измерения. Для достижения перечисленных характеристик предлагается модифицировать МНК Прони с помощью ИМШМ. Предложенный авторами К. Штейглицом и Л.Е. МакБрайдом итерационный метод предназначен для идентификации линейных систем по входным и выходным отсчетам в присутствии аддитивного шума с помощью минимизации СКО между системой и ее выходной моделью. В качестве модели в данном методе выбрана линейная модель, которая предполагает, что входные и выходные отсчеты связаны рациональным  $z$ -преобразованием вида  $N(z)/D(z)$ , где  $N(z) = \gamma_0 + \gamma_1 z^{-1} + \dots + \gamma_{n-1} z^{-n+1}$ ,  $D(z) = 1 + \beta_1 z^{-1} + \dots + \beta_n z^{-n}$ . При идентификации линейных систем ИМШМ решается задача минимизации ошибки

$$\min_{z, \theta} \left\{ \sum e_j^2 \right\} = \min_{z, \theta} \left\{ \int_{2\pi j} |Y(z)[N(z)/D(z)] - W(z)|^2 dz/z \right\}, \quad (9)$$

$$Y(z) = \sum y_j z^{-j}, \quad W(z) = \sum w_j z^{-j},$$

где  $y_j$  - отсчеты на входе системы;  $w_j$  - отсчеты на выходе системы. В (9) суммирование выполнено по длине записи, а интегрирование производится по единичной окружности. Суть модификации МНК Прони заключается в вычислении параметров ПФ РФ (8) с помощью ИМШМ. Для этого в ИМШМ необходимо задать модель  $N(z)/D(z)$ , порядок которой совпадает с порядком РФ:

$$N(z)/D(z) = \sum_{m=0}^{p-1} \gamma_m z^{p-m-1} / \sum_{m=0}^p \beta_m z^{p-m}, \quad \beta_0 = 1. \quad (10)$$

Применительно к решаемой задаче на вход линейной системы, то есть РФ, нужно подать «единичный импульс»  $y = [1, 0, \dots, 0]$ . На выходе при этом будут отсчеты ИХ  $h_i, i = \overline{1, \infty}$ , первые  $K$  из которых нам известны, так как они по условию выбраны равными соответствующим отсчетам СБ  $x_i, i = \overline{1, K}$ . При этом задача минимизации ошибки (9) запишется в виде

$$\min_{z, \theta} \left\{ \sum e_j^2 \right\} = \min_{z, \theta} \left\{ \int_{2\pi j} |N(z)/D(z) - H(z)|^2 dz/z \right\}, \quad (11)$$

$$Y(z) = \sum_{i=1}^K y_i z^{-i+1} = 1, \quad W(z) = \sum_{i=1}^{\infty} h_i z^{-i+1} = H(z).$$

Видно, что выражение (11) достигнет своего минимума, когда коэффициенты модели (10)  $\gamma_m$  и  $\beta_m$  совпадут с соответствующими коэффициентами  $b_m$  и  $a_m$  ПФ (8). После вычисления параметров ПФ (8) дальнейшие вычисления выполняются, как и в МНК Прони.

В итоге алгоритм с ПППСП и соответствующей ему блок-схемой, приведенной на рисунке 5, будет выглядеть следующим образом.

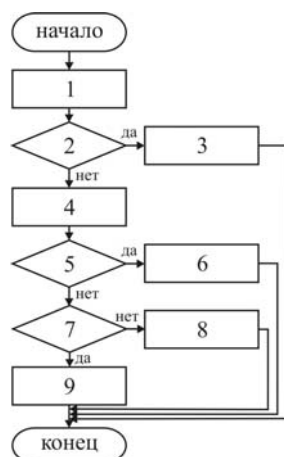


Рисунок 5

1. Осуществляется поиск максимальной спектральной составляющей в спектре  $P_{\max}$ . Производится расчет соответствующей ей дальности  $r_{\max}$ .
2. Если  $r_{\max} \in [1, r_{\text{дно}} - dr_0]$  м, то осуществляется переход к п.3, иначе - к п.4. Величина  $dr_0 = (0.5 \div 0.7)\delta_R$  выбирается исходя из минимального расстояния между уровнем материала

и дном резервуара, при котором отражения от них разрешаются по частоте.

3. За оценку дальности до уровня материала принимается величина  $r_{уровня} = r_{max}$ .
4. Находится максимальная (вторая по интенсивности) спектральная составляющая в спектре в диапазоне  $[r_{дно} - dr_0, r_{max}] \cup (r_{max}, r_{дно}]$ . Обозначим соответствующие ей интенсивность  $P_{max2}$  и дальность  $r_{max2}$ .
5. Если найденный максимум  $P_{max2}$  больше заданного порога  $P_{max2}/P_{max} \geq a$ , то осуществляется переход к п.6, иначе - к п.7. При выборе величины порога наиболее удачным является порог  $P_{max0}/P_{maxдно} \ll a < P_{maxs}/P_{maxдно}$ , где  $P_{max0}$  - максимальная интенсивность МО, которое может быть принято в определенных случаях (если эти случаи имеют место исходя из приведенного алгоритма) за полезный сигнал;  $P_{maxдно}$ ,  $P_{maxs}$  - максимально возможные интенсивности отражений от дна резервуара и уровня материала соответственно.
6. За оценку дальности до уровня принимается величина  $r_{уровня} = r_{max2}$ .
7. Если  $r_{max} > r_{дно}$ , то осуществляется переход к п.9, иначе - к п.8.
8. За оценку дальности до уровня принимается  $r_{уровня} = r_{max}$ .
9. За оценку дальности до уровня принимается  $r_{уровня} = r_{дно}$ .

**Алгоритм оценки частоты СБ на основе ИМШМ.** При реализации алгоритма используется модификация известного метода ПСА, основанного на модели АРСС, в котором осуществляется одновременное оценивание параметров АР и СС с помощью ИМШМ. Предлагаемая модификация заключается в том, что в качестве входного процесса  $y_i$  используется не реализация белого шума, а «единичный импульс» и вычисление спектра осуществляется по СБ с увеличенной (предсказанной) за пределами имеющейся записи длиной  $K$ , то есть отсчетам  $x_i, i = K + 1, l \cdot K, l = 1, 2, 3, \dots$ , с помощью БПФ. Поскольку известно, что данные состоят из смеси синусоид и аддитивного шума, использование в качестве входного процесса единичного импульса позволяет получать более надежные оценки мощности, чем с помощью АР-методов. Для дополнительного повышения устойчивости спектральных оценок вычисление спектра производится в базисе Фурье с использованием СБ с увеличенной длиной записи.

В качестве модели временного ряда используется АРСС модель

$$x_i = \sum_{m=0}^q b_m y_{i-m} - \sum_{m=1}^p a_m x_{i-m} = \sum_{n=1}^{\infty} h_n y_{i-n-1}, \quad b_0 = 1, \quad (12)$$

которая определяет связь между входными и выходными отсчетами РФ с ПФ

$$H(z) = \sum_{m=0}^q b_m z^{q-m} / \sum_{m=0}^p a_m z^{p-m}, \quad a_0 = 1, \quad (13)$$

где  $x_i$  - последовательность отсчетов получаемых на выходе РФ,  $y_i$  - последовательность отсчетов, подаваемых на вход РФ,  $h_n$  - отсчеты ИХ. Неизвестными параметрами являются коэффициенты  $a_m, b_m$ . Их поиск производится с помощью ИМШМ аналогично, как и в ММНК Прони, но для РФ с ПФ вида (13) - с порядками  $p$  и  $q$ , которые равны порядкам АР и СС соответственно. То есть синтез РФ также осуществляется при условии равенства соответствующих отсчетов ИХ  $h_i$  и СБ  $x_i$ . Вычислив коэффициенты  $a_m, b_m$  искомой ПФ РФ, определяем отсчеты

ИХ  $h_i$  для  $i = \overline{1, l \cdot K}$ , то есть в  $l$  раз превышающие длину записи отсчетов СБ. Вычислить отсчеты ИХ можно, используя выражение (12) с учетом того, что на вход РФ подается единичный импульс. Полученные отсчеты ИХ будут совпадать с соответствующими отсчетами СБ, в том числе и за пределами имеющейся в нашем распоряжении его длины записи, поскольку РФ синтезирован с условием их равенства. Данное утверждение следует из выражения

$$\min_{z, \theta} \left\{ 1/2\pi j \oint |N(z)/D(z) - H(z)|^2 dz/z \right\} = \min_{z, \theta} \left\{ 1/2\pi j \oint \left| \sum_{i=1}^{\infty} (g_i - h_i) z^{-i+1} \right|^2 dz/z \right\}, \quad (14)$$

где  $g_i$  - отсчеты ИХ РФ с ПФ,  $N(z)/D(z) = \sum_{m=0}^q \gamma_m z^{q-m} / \sum_{m=0}^p \beta_m z^{p-m}$ .

Видно, что в выражении (14) осуществляется минимизация квадратичной ошибки воспроизведения заданной бесконечной ИХ (которая должна совпадать с СБ  $x_i$  для  $i = \overline{1, \infty}$ ) по ее явно заданному начальному участку (который совпадает с СБ  $x_i$  при  $i = \overline{1, K}$ ). В итоге получим ИХ, которая минимизирует квадратичную ошибку воспроизведения СБ. Вычисленные таким образом отсчеты ИХ  $h_i, i = \overline{1, l \cdot K}$ ,  $l = 1, 2, 3, \dots$ , можно использовать для дальнейших расчетов в качестве отсчетов СБ  $x_i, i = \overline{1, l \cdot K}$ ,  $l = 1, 2, 3, \dots$ . Полученный СБ с увеличенной длиной записи используется для вычисления спектра с помощью БПФ. Вычисленный спектр является наиболее близким к истинной спектральной плотности мощности по сравнению с другими рассмотренными методами ПСА. Кроме того, для обеспечения высокого разрешения нет необходимости увеличивать величину порядка модели более  $p = p_{s \min}$ , поэтому отсутствуют и ЛСП.

Поскольку спектр в данном методе вычисляется с использованием БПФ СБ с увеличенной длиной записи, то принцип поиска спектрального пика, соответствующего отражениям от уровня материала и оценки частоты СБ (дальности), аналогичен алгоритму на основе БПФ с ПППСП.

**Алгоритм на основе метода EV.** В спектре, получаемом с помощью метода EV, нет ЛСП, превышающих по интенсивности спектральный пик сигнала. Однако устойчивость спектральных оценок составляет  $Q = 2 \div 8$ , то есть они имеют большую дисперсию. Это может привести к аномальным ошибкам, возникающим вследствие ошибочного принятия спектрального пика МО за спектральный пик полезного сигнала. Для исключения этого используется двухэтапная ПППСП, аналогичная используемой в МНК Прони. Для уменьшения вероятности ошибочного принятия спектрального пика МО за спектральный пик полезного сигнала предложена процедура проведения повторного вычисления спектра по собственным векторам матрицы данных, относящимся к подпространству сигнала.

**В четвертой главе** представлены результаты моделирования, натуральных экспериментальных исследований и опытной эксплуатации РДЧМ с программным обеспечением на основе разработанных алгоритмов. Экспериментальные исследования и опытная эксплуатация выполнены в рамках хоздоговорных НИР, проводимых с предприятием ООО «Контакт-1». Экспериментальные исследования выполнены на поверочных стендах, разработанных предприятием ООО «Контакт-1» и прошедших аттестацию как средства измерения.

Моделирование выполнено для РДЧМ со следующими основными параметрами:  $f_0 = \omega_0/2\pi = 10$  ГГц;  $f_\delta = \omega_\delta/2\pi = 250$  МГц;  $T = 0.01$  с; отношение сигнал-шум  $q_{c-ш} = 10\lg(2E/N_0) = 70 \div 76$  дБ, где  $E$  - энергия сигнала. Проведено исследование алгоритмов в зависимости от значения величин задаваемых для них параметров (порядка модели, количества итераций, количества отсчетов СБ, размерности модифицированной ковариационной матрицы и др.) при наличии МО и шумовой помехи. Даны рекомендации по выбору параметров для разработанных алгоритмов, при которых они обеспечивают наилучшие характеристики. Проведен сравнительный анализ алгоритмов на основе МНК Прони, ММНК Прони, ИМШМ, метода EV с алгоритмом на основе БПФ с ПППСП. Моделирование показало, что наилучшие характеристики при наличии МО обеспечивают алгоритмы на основе метода EV и ММНК Прони. Затем следует алгоритм на основе ИМШМ, который практически не уступает первым двум, и алгоритм на основе МНК Прони, который уступает остальным на  $20 \div 30$  %. Сравнение данных алгоритмов с алгоритмом на основе БПФ с ПППСП показывает, что они позволяют существенно повысить точность измерения дальности. Выигрыш выражается в уменьшении максимальной погрешности измерения дальности от 4 до 20 раз, а также за счет сокращения зоны, где погрешность измерения дальности под воздействием МО превышает величину 1 мм от 5 до 10 раз.

Исследования, проведенные на стенде в свободном пространстве, показали, что разработанные алгоритмы позволяют более чем в  $4 \div 6$  раз повысить точность измерения дальности при наличии МО по сравнению с алгоритмом на основе БПФ с ПППСП, о чем свидетельствуют соответствующие зависимости, приведенные на рисунках 6-8. Отношение сигнал-помеха составляет  $q_{c-n} \approx -8$  дБ, отношение сигнал-шум  $q_{c-ш} \approx 73$  дБ. Результаты экспериментальных исследований подтверждают результаты моделирования. Проведена проверка разработанных алгоритмов при опытной эксплуатации РДЧМ «БАРС-351», производимого предприятием ООО «Контакт-1», на резервуаре с дизельным топливом. Измерения уровня в резервуаре производились в полностью автономном режиме в течение нескольких недель. При измерении дальности до уровня топлива в резервуаре имели место МО от дна резервуара и МО, возникающие вследствие переотражений от поверхности материала и крышки резервуара. Влияние отмеченных МО сказывалось при

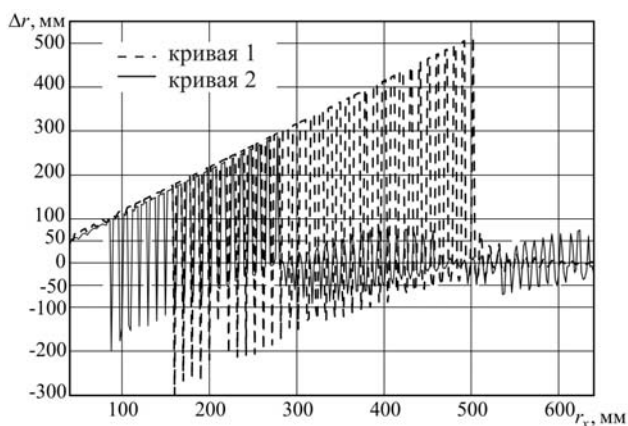


Рисунок 6 – Зависимость погрешности измерения дальности для алгоритма на основе БПФ с ПППСП: кривая 1 - при применении оконной функции Блекмана; кривая 2 - без нее

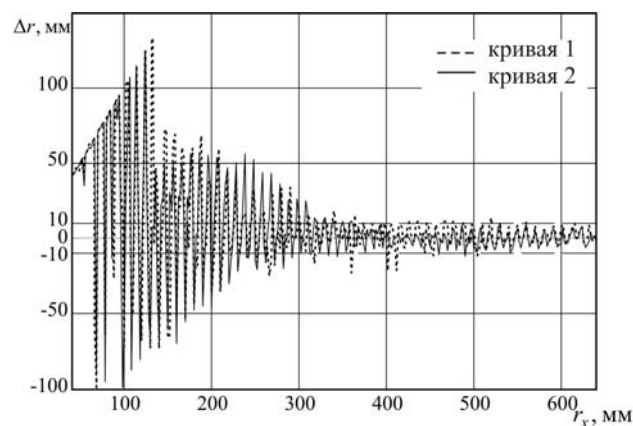


Рисунок 7 – Зависимость погрешности измерения дальности для алгоритма на основе: МНК Прони - кривая 1; ММНК Прони, ИМШМ - кривая 2

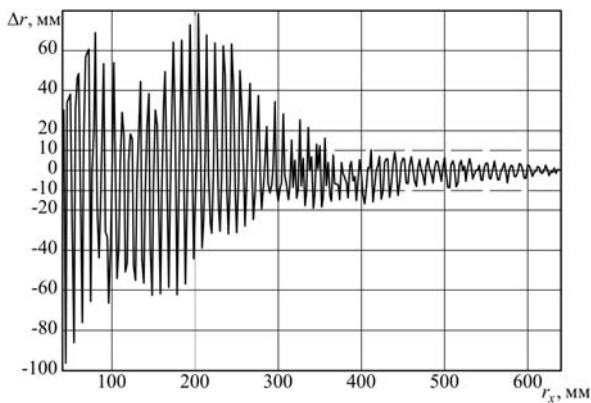


Рисунок 8 – Зависимость погрешности измерения дальности для алгоритма на основе метода EV

приближении уровня ко дну и к антенне. Результаты эксплуатации показали, что алгоритмы на основе ММНК Прони, ИМШМ и метода EV при наличии МО позволяют увеличить точность измерения дальности примерно в 3 раза по сравнению с алгоритмом на основе БПФ с ПППСП. Результаты проведенных измерений, подтверждающие отмеченный выигрыш, представлены на рисунке 9 в виде графиков погрешности измерения в зависимости от суточного времени, пересчитанного в секунды. Погрешность измерения для алгоритмов на основе ММНК Прони, ИМШМ практически аналогична погрешности для алгоритма на основе метода EV. Необходимо учитывать, что выигрыш может быть больше. Объясняется это тем, что интервал дальностей, где влияние МО наиболее сильно сказывается на точности измерения, не был достигнут. В этом можно убедиться, если сравнить поведение зависимостей на рисунках 6-8 и 9.

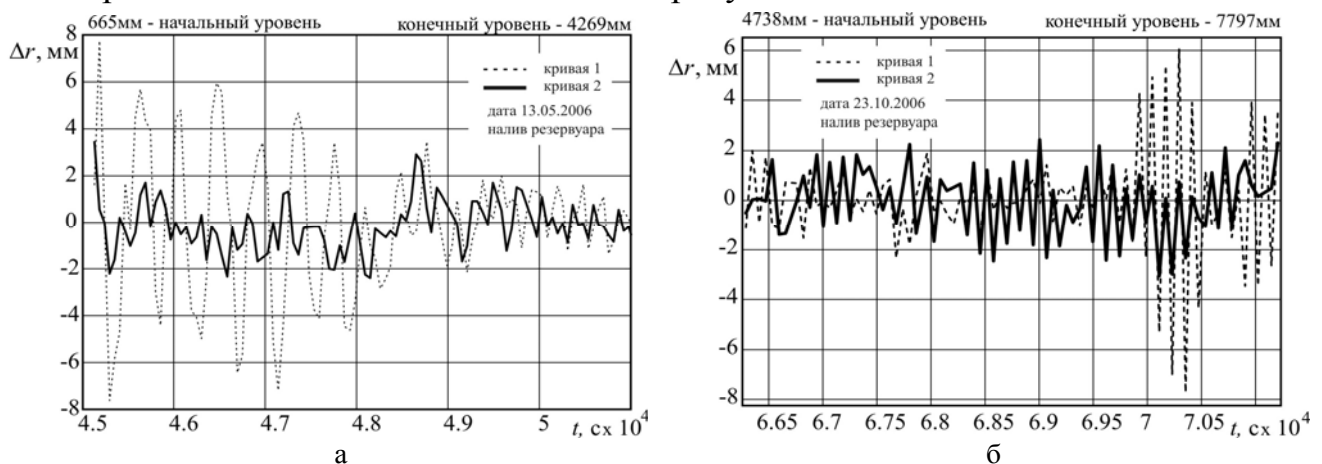


Рисунок 9 – Погрешность измерения дальности при наливе резервуара  
 кривая 1 – алгоритм на основе БПФ с ПППСП, кривая 2 - алгоритм на основе метода EV  
 а – при удалении уровня материала от дна начиная с уровня 665мм,  
 б – при приближении уровня материала к антенне (крышке резервуара)

**В заключении** сформулированы основные научные положения диссертационной работы, которые состоят в следующем.

1. Разработан алгоритм оценки частоты, производящий обработку СБ на 2-х ПМЧ передатчика РДЧМ, который позволяет уменьшить погрешность измерения дальности по сравнению с алгоритмами, производящими оценку дальности (частоты СБ) по положению максимума спектра в базисе Фурье. Выигрыш заключается в следующем: отсутствует методическая погрешность измерения, обусловленная влиянием соседних периодов спектра в базисе Фурье; уменьшается влияние шумовой помехи, так как отсутствует необходимость использования оконных функций для уменьшения методической погрешности. В результате СКО оценки дальности уменьшается примерно на 40 %.
2. Проведено исследование влияния искажений, характерных для РДЧМ, и нестабильности его параметров на точность оценки частоты по спектру СБ, что позволя-



ет произвести выбор алгоритма, минимизирующего ошибку оценки дальности.

3. Разработаны алгоритмы на основе МНК Прони и метода оценивания частоты, осуществляющего анализ собственных значений модифицированной ковариационной матрицы, которые позволяют производить поиск спектрального пика полезного сигнала в сложной помеховой обстановке, обусловленной наличием МО и ЛСП. Это обеспечивает повышение точности оценки дальности от 3 до 20 раз по сравнению с алгоритмами, использующими спектр в базисе Фурье.

4. Для реализации алгоритма на основе МНК Прони:

- предложены процедуры, позволяющие исключить аномальные ошибки измерения дальности, возникающие вследствие ошибочного принятия ЛСП за спектральный пик сигнала, отраженного от уровня материала;
- разработан алгоритм предварительной оценки частоты, использующий спектр в базисе Фурье, в котором реализована ПППСП, соответствующего отражениям от уровня материала в сложной помеховой обстановке.

5. Разработаны алгоритмы на основе ММНК Прони и ИМШМ, позволяющие упростить процедуры поиска спектрального пика полезного сигнала при наличии МО и повысить точность оценки дальности от 3 до 20 раз.

ММНК Прони позволяет обеспечить выигрыш, состоящий в следующем:

- обеспечивается при минимально требуемом значении порядка модели на 20-30 % меньшая погрешность измерения дальности, чем для алгоритма измерения дальности на основе МНК Прони с порядком модели, превышающим требуемое его минимальное значение больше чем на порядок.
- в спектре отсутствуют ЛСП, которые могут превышать по амплитуде спектральный пик синусоидальных компонент, присутствующих в СБ, что существенно упрощает ПППСП.

Алгоритм оценки частоты на основе ИМШМ позволяет:

- обеспечить высокую устойчивость спектральных оценок по сравнению с алгоритмами на основе МНК Прони, ММНК Прони, метода EV;
- обеспечить высокое разрешение по частоте, не уступающее ММНК Прони, без значительного увеличения вычислительных затрат;
- значительно упростить и повысить надежность алгоритма поиска спектрального пика, соответствующего полезному сигналу.

Проверка разработанных алгоритмов осуществлена не только на модельных задачах при проведении компьютерного моделирования, но и на практике, в результате натурных экспериментальных исследований как на экспериментальных стендах, прошедших сертификацию и аттестацию, так и в реальных промышленных условиях эксплуатации РДЧМ, что подтверждено соответствующим актом.

### **СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Паршин В.С., Багдадюлян А.А. Сравнение эффективности функций различия при оценке несущей частоты радиоимпульса //Материалы 4-й МНТК «ИКИ - 2003». Барнаул, 2003. С. 50-55.
2. Паршин В.С., Багдадюлян А.А. Аппроксимация плотности вероятности взвешенной суммы экспоненциально распределенных величин //Межвузовский сборник научных трудов. Выпуск 2. Методы и устройства обработки сигнала

- лов в радиотехнических системах. Рязань, 2003. С. 28-32.
3. Паршин В.С., Давыдочкин В.М., Багдадюлян А.А. Уменьшение дискретной ошибки частотно-модулированного дальномера адаптивным диапазоном модуляции //Труды РНТОРЭС им. А.С. Попова. Серия: Научная сессия, посвященная Дню радио. Выпуск 58, т. 1. М., 2003. С. 59-60.
  4. Маторин А.В., Багдадюлян А.А., Аграмаков М.Ю. Расчет широкополосного полоскового излучателя //Вестник РГРТА. 2003. Вып. 11. С. 37-40.
  5. Паршин В.С., Багдадюлян А.А., Гусев В.С. Влияние аддитивного белого шума на точность измерения частоты в спектральной области //Тез. докл. 3-й МНТК «Физика и технические приложения волновых процессов». Волгоград, НИ ИИД «Авторское перо», 2004. С. 38-41.
  6. Езерский В.В., Паршин В.С., Баранов И.В., Гусев В.С., Багдадюлян А.А. Сравнительный анализ помехоустойчивости алгоритмов измерения дальности ЧМ дальномером в спектральной области //Вестник РГРТА. 2004. Вып. 14. С. 43-48.
  7. Паршин В.С., Езерский В.В., Багдадюлян А.А. Улучшение характеристик ЧМ дальномера при наличии мешающих отражателей с помощью параметрического спектрального анализа //Цифровая обработка сигналов и её применение: 7-я МНТК. Труды РНТОРЭС им. Попова. Вып. VII-1. М., 2005. С. 77-80.
  8. Паршин В.С., Багдадюлян А.А. Оценка влияния паразитной амплитудной и фазовой модуляции на точность измерения частоты при использовании метода наименьших квадратов Прони //Труды 7-й МНТК РНТОРЭС им. А.С. Попова. Серия: Цифровая обработка сигналов и ее применение. Вып. 7, т. 1. М., 2005. С. 218-222.
  9. Багдадюлян А.А. Помехоустойчивость алгоритмов измерения частоты в спектральной области //Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций. 14-я международная НТК. Рязань. 2005. С. 44-45.
  10. Паршин В.С., Багдадюлян А.А. Измерение расстояния до уровня материала в резервуаре при наличии мешающих отражений от его дна, превышающих по интенсивности полезный сигнал //Цифровая обработка сигналов и её применение: 8-МНТК. Труды РНТОРЭС им. Попова. Вып. VIII-1. М. 2006. С. 306-308.
  11. Паршин В.С., Багдадюлян А.А. Измерение частоты сигнала биений методом максимального правдоподобия для повышения точности измерения дальности в ЧМ дальномерах //Труды РНТО РЭС им. А.С. Попова. Серия: Научная сессия, посвященная Дню радио. Выпуск 61, М. 2006. С. 55-57.
  12. Паршин В.С., Багдадюлян А.А. Повышение точностных характеристик ЧМ дальномера при наличии мешающих отражений с помощью методов параметрического спектрального анализа //Вестник РГРТУ. 2006. Вып. 18. С. 46-50.
  13. Паршин В.С., Багдадюлян А.А. Использование метода максимального правдоподобия для повышения точности измерения расстояния дальномером с частотной модуляцией зондирующего сигнала //Измерительная техника. 2006. № 10. С. 22-26.
  14. Паршин В.С., Багдадюлян А.А. Модифицированный метод наименьших квадратов Прони, использующий итерационный метод Штейглица - МакБрайда //Цифровая обработка сигналов и её применение: 9-я МНТК. Труды РНТОРЭС им. Попова Вып. IX-1. М. 2007. С. 77-80.

Багдадюлян Александр Альбертович

**Алгоритмы оценки частоты сигнала биений на основе методов  
параметрического спектрального анализа для дальномеров с частотной  
модуляцией зондирующего сигнала**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано к печати 24 мая 2007г.  
Формат бумаги 60×84/16, 80г/м<sup>2</sup>  
Объем 1 печ. л.  
Зак. 32. Тираж 100 экз.

Отпечатано на участке оперативной полиграфии ГНУ ВНИМС  
г. Рязань, Щорса 38/1