

Работа выполнена в Институте прикладной физики РАН,  
г. Нижний Новгород

*На правах рукописи*

РОДИОНОВ Александр Алексеевич

**МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ, УСТОЙЧИВЫЕ  
К ПОМЕХАМ С НЕИЗВЕСТНЫМИ СВОЙСТВАМИ**

01.04.03 – радиофизика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2008

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук  
В. И. Турчин

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, доцент  
А. Г. Флакман  
(Нижегородский государственный университет  
им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород)

кандидат физико-математических наук  
А. И. Малеханов  
(Институт прикладной физики РАН,  
Нижний Новгород)

Ведущая организация:

Московский государственный технический  
университет им. Н. Э. Баумана, Москва

Защита состоится «\_\_\_» октября 2008 г. в \_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.07 при Нижегородском государственном университете им. Н. И. Лобачевского по адресу: 603600, г. Нижний Новгород, ГСП-20, пр. Гагарина, 23, корп. \_\_, радиофизический факультет, ауд. \_\_\_.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Института прикладной физики РАН.

Автореферат разослан «\_\_\_» сентября 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.ф.-м.н., доцент



В. В. Черепенников

## Общая характеристика диссертации

**Актуальность темы диссертации.** Одной из актуальных задач статистической радиофизики является оценка параметров сигнала, наблюдаемого на фоне помех. Необходимость ее решения возникает в большом числе практических приложений, таких как радиолокация, сейсмическое зондирование, радиоастрономия, гидроакустика, связь и т.п. Методы оценки параметров сигналов, основанные, в основном, на принципе максимума правдоподобия, в настоящее время хорошо развиты и изучены для помех, имеющих простые свойства: нормальное распределение, стационарность, известный второй момент и т.п. В последнее время, однако, все большее внимание уделяется сценариям, в которых допускается отклонение помех от простых моделей, что более соответствует реальным условиям эксплуатации различных систем.

Соответственно, актуальной является разработка методов оценки параметров сигналов, устойчивых по отношению к априорному незнанию свойств и структуры помехи. К наиболее значимым «пробелам» в знании свойств помехи можно отнести незнание ее второго момента и возможное «загрязнение» нормально распределенной помехи, например, случайными импульсами.

Наиболее сильно влияние импульсной помехи может сказаться при оценке мощности слабых случайных сигналов, что имеет место в различных разновидностях пассивной локации: в радиоастрономии, в гидроакустике при определении характеристик слабых источников шума и т.д. Известно достаточно много подходов к решению подобной задачи. Традиционным способом борьбы с импульсными помехами является клипирование – «вырезание» участков записи, на которые воздействовала импульсная помеха (например, А.В. Симкин и др.). Другим распространенным методом подавления импульсной помехи является использование медианой фильтрации в различных вариантах (Дж. Тьюки, У. Прэтт и др.). Оба способа имеют определенные недостатки. В первом случае для клипирования необходимо знание порога обнаружения импульсной помехи, величина которого связана с неизвестной мощностью полезного сигнала. Во втором случае, при наличии большого количества импульсов, оценка оказывается смещенной. С учетом вышесказанного, разработка улучшенных способов оценки дисперсии гауссового сигнала в присутствии импульсной помехи представляется достаточно актуальной.

Разработке методов оценки параметров сигнала, наблюдаемого на фоне гауссовой помехи с неизвестным вторым моментом, также уделялось достаточно много внимания. Традиционно такие исследования проводились в рамках адаптивной обработки сигналов в антенных решетках. Классический адаптивный подход требует знания матрицы ковариации помехи. На практике чаще всего используется ее эмпирическая оценка, получаемая за некоторое конечное время наблюдения, за счет чего, собственно, и обеспечивается адаптация антенной системы к текущей помеховой обстановке (Н.Л. Van Trees, Л.С. Godara, I.S. Reed и др.). При этом, однако, возникает определенная слож-

ность, связанная с тем, что помеха наблюдается в смеси с полезным сигналом, и оценка ее статистических свойств оказывается смещенной. Рассматриваемое во многих работах (Е.Л. Kelly, Д.И. Леховицкий и др.) формирование оценки помехи за счет так называемой обучающей выборки в отсутствие полезного сигнала часто вступает в противоречие с практическими требованиями.

В последнее десятилетие наметился несколько иной подход к формированию адаптивных алгоритмов обработки, который заключается в поиске глобального максимума функции правдоподобия одновременно как по параметрам, характеризующим полезный сигнал, так и по неизвестной матрице ковариации помехи (М. Pesavento, S.A. Prasad, Y. Yardimici). Существенным моментом здесь является однозначность решения такой задачи для различных сценариев – моделей наблюдаемых сигналов. Целенаправленное исследование данного вопроса, а также сопоставление результатов, получаемых строго в рамках метода максимума правдоподобия, и при классическом способе адаптивного формирования вектора весовых коэффициентов, насколько известно, не проводилось.

В задачах адаптивной обработки сигналов в антенных решетках часто предполагается, что временные отсчеты помехи некоррелированы, а её мощность не зависит от времени. Такое предположение далеко не всегда выполняется. В частности, при отсутствии корреляции отсчетов мощность помехи может меняться (Y. Yardimici). Фактически такая же ситуация, только в пространственной области, возникает в сейсмическом зондировании (М. Pesavento): помеха на различных элементах антенной решетки является некоррелированной, однако её мощность неодинакова. Решение таких задач с помощью метода максимального правдоподобия включает оценки неизвестных мощностей, причем эти оценки состоят в некогерентном усреднении сигнала по «второму» измерению (временному или пространственному), в котором мощность неизменна. Отдельный интерес представляет случай, когда «второе» измерение отсутствует; при этом метод максимального правдоподобия фактически не даёт приемлемого решения. Анализ такой одномерной задачи представляет интерес при наличии негауссовых помех, поскольку помеху с неравномерной мощностью можно интерпретировать как выборку из некоторого негауссова распределения.

Другим довольно распространенным случаем является неравномерность спектра помехи – «окрашенность», то есть при неизменной мощности присутствует корреляция временных отсчетов. Известно, что классическая оценка спектральной плотности мощности (СПМ) в виде спектрограммы, следующая из метода максимального правдоподобия, является несостоятельной, поэтому для оценки СПМ помехи используются другие методы, дающие состоятельные оценки. В частности, может использоваться один из вариантов классических усредненных периодограмм или параметрический метод, основанный на модели авторегрессии (S.M. Kay). Такие методы оценки рассчита-

ны на СПМ определенного типа: в первом случае спектр должен быть достаточно гладким, во втором случае – не иметь выраженных провалов. Существенный интерес представляет построение универсального метода, не накладывающего ограничений на вид СПМ.

Помимо разработки достаточно универсальных схем оценки параметров сигналов, потенциально пригодных для многих практических задач, актуальной проблемой является собственно разработка конкретных практических приложений. В настоящей работе в качестве таковых рассматривались две задачи гидроакустики: локация «на просвет» и измерение траектории движущегося тонального источника звука.

Просветной локации, в которой цель – источник рассеянного звукового поля – перемещается между источником подсветки и антенной решеткой, в последнее время уделяется большее внимание (В.А. Зверев, А.Л. Матвеев, В.В. Митюгов, В.И. Турчин, В.В. Бородин и др.). Основным достоинством метода по сравнению с традиционной локацией является существенное возрастание сечения рассеяния в прямом направлении по сравнению со случаем обратного рассеяния. Роль помехи в просветной локации играют прежде всего временные и пространственные флуктуации сигнала подсветки, постоянно присутствующего на выходе приемной системы; эти флуктуации маскируют дифрагированный сигнал, амплитуда которого существенно меньше средней амплитуды сигнала подсветки. Временной спектр флуктуаций может иметь сложную структуру, однако основная его энергия сосредоточена в окрестности частоты излучения. Для подавления такой помехи обычно используется фильтр высоких частот с эмпирически подобранной частотой среза (В.А. Зверев, А.Л. Матвеев и др.). Такой подход, во-первых, требует предварительного исследования спектра помехи, и, во-вторых, является неоптимальным, поскольку не учитывает форму спектра помехи. В связи с этим существенный интерес представляет разработка теоретически обоснованных, близких к оптимальным помехоустойчивых методов обнаружения цели в просветной локации.

Другим приложением, в котором требуется выделять полезный сигнал на фоне сложной помехи, является задача измерения траектории движущегося источника. В гидроакустике эта задача возникает, в частности, как вспомогательная при измерении уровней подводного шума судов. Обычно с этой целью на исследуемом объекте укрепляют специальный источник импульсного или тонального сигнала; принятый от этого источника сигнал и используют для определения траектории.

Процедуры оценки траекторий гидроакустических источников разрабатывались и исследовались для достаточно широкого набора сценариев. Прежде всего, необходимо отметить большой цикл работ, в котором траектория источников определялась в случае большого расстояния между источником и антенной в контексте задачи обнаружения «чужих» источников. При этом, как правило, применяются вертикальные антенные решетки и подход, извест-

ный под названием метода согласованного поля (Н.Р. Вукер, А.В. Ваггероер, W.A. Kuperman и др.). Случай горизонтальной антенной решетки и ближнего поля рассматривался гораздо менее активно.

Для измерения траекторий в ближней зоне антенны могут использоваться как низкочастотные (обычно 200–300 Гц), так и высокочастотные источники (в морских условиях – несколько кГц). Существующие методы определения траектории с помощью низкочастотных источников основаны в основном на пространственной обработке сигнала (М.Д. Вилмут), при этом для достижения высокой точности используются достаточно громоздкие антенные решетки (Д.А. Орлов). На высоких частотах, напротив, во многом может быть использована временная обработка (В.С. Беляев, В.Г. Quinn), что позволяет использовать достаточно компактные приёмные системы. Отражение от поверхности на высоких частотах носит в основном некогерентный характер и проявляется в виде мультипликативной помехи при измерении траектории. Влияние мультипликативной помехи особенно сильно на небольших глубинах. Поэтому существенный интерес представляет разработка помехоустойчивых методов определения траектории высокочастотного источника, движущегося на произвольных глубинах на небольшом расстоянии от приемной системы. Разработка таких методов актуальна для целого ряда различных конфигураций приёмных систем: горизонтальная или вертикальная антенная решетка с заполненной или разреженной апертурой.

**Цель работы.** В соответствии с изложенным выше кругом проблем, основной целью диссертационной работы является:

- разработка методов оценки параметров сигналов в присутствии сложных помех различного типа в случаях:
  - измерения средней мощности гауссова процесса при наличии импульсных помех;
  - оценки параметров пространственно-временного сигнала в присутствии помехи с неизвестной пространственной корреляционной матрицей;
  - оценки параметров временного сигнала на фоне независимой помехи с меняющейся мощностью;
  - оценки параметров пространственно-временного сигнала на фоне стационарной помехи с неизвестной спектральной плотностью мощности;
- разработка и экспериментальная апробация помехоустойчивых методов обработки сигналов для гидроакустических приложений:
  - определение параметров цели в просветной локации;
  - определение траектории высокочастотного тонального источника звука в мелком море с использованием антенных решеток.

**Научная обоснованность и достоверность результатов**, полученных в диссертации, обеспечивается применением к решению поставленных задач методов параметрического оценивания, основанных на современной теории обработки сигналов. Особое внимание в диссертации уделено экспериментальной апробации предложенных методов и алгоритмов, которая подтвердила их эффективность, а также исследованию погрешностей.

**Научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.** Научная новизна диссертационной работы определяется полученными в ней оригинальными результатами:

1. Разработана процедура оценки средней мощности гауссова процесса, наблюдаемого на фоне импульсных помех широкого класса. Показано, что предложенная оценка дает более высокую точность по сравнению с медианными оценками и близка к границе Крамера–Рао. Апробация предложенного метода на экспериментальных гидроакустических данных подтвердила его эффективность.
2. Предложены процедуры адаптивной обработки сигналов в антенных решетках при неизвестной матрице ковариации помехи, корректно учитывающие присутствие в имеющихся отсчетах полезного сигнала. Показано, что в случае, когда временная зависимость полезного сигнала известна, полученная процедура обладает большей точностью по сравнению с известным подходом, игнорирующим присутствие полезного сигнала в обрабатываемом массиве данных. В случае полностью неизвестной временной зависимости показано, что решение является не единственным. Предложен способ выбора решения на основе минимаксного критерия.
3. Для оценки параметров детерминированного пространственно-временного сигнала, наблюдаемого на фоне гауссовой помехи с неизвестным вторым моментом, предложены максимально правдоподобные процедуры, инвариантные к неизвестной структуре помехи и названные «слепыми» оценками по аналогии с процедурами «слепой» эквализации сигналов.
4. Предложены и экспериментально исследованы два помехоустойчивых метода определения параметров движения рассеивателя, пересекающего трассу между источником тональной акустической подсветки и горизонтальной приемной антенной решеткой, в условиях дальнего распространения в мелком море. Первый метод основан на авторегрессионной оценке спектра помехи; второй метод, построенный на основе техники «слепых» оценок, пригоден для помех более широкого класса.
5. Предложен и экспериментально исследован помехоустойчивый метод определения траектории высокочастотного (2–5 кГц) тонального источника звука в мелком море с использованием антенных решеток с небольшой (единицы-десятки метров) апертурой при движении источника на расстояниях, сравнимых с глубиной места.

**Практическая значимость.** Разработанный в диссертации метод оценки мощности гауссова процесса в присутствии импульсной помехи может быть использован при определении уровня подводного шума в инфразвуковом диапазоне частот с использованием антенных решеток. Разработанные методы определения параметров цели в просветной локации могут применяться в системах, предназначенных для защиты от несанкционированного проникновения в охраняемые акватории. Экспериментальная апробация разработанных методов и алгоритмов показала их высокую эффективность; они могут быть использованы в гидроакустических приборах и системах, развертываемых в условиях мелкого моря.

Результаты диссертации были использованы в ряде НИЭР и ОКР по гидроакустике, выполняемых в ИПФ РАН, при выполнении проектов в рамках грантов РФФИ и Минпромнауки, а также при проведении работ по ряду международных контрактов.

**Публикации и апробация результатов.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 11 публикациях (3 статьи [3,4,7], 1 препринт [8], 7 докладов и тезисов докладов [1,2,5,6,9-11]) и были представлены на следующих конференциях: IVth International Conference on Antenna Theory and Techniques (Севастополь, 2003 г.), X международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 2004 г.), 10-я Нижегородская сессия молодых ученых (2005 г.), Vth International Conference on Antenna Theory and Techniques (Киев, 2005 г.), научно-техническая конференция «Проблемы метрологии гидрофизических измерений ПМГИ-2006», (Москва, 2006 г.), а также на конкурсах молодых ученых Института прикладной физики РАН, семинарах Отделения гидрофизики и гидроакустики ИПФ РАН, научной школы Н. С. Степанова, В. А. Зверева.

**Личный вклад автора.** Все приведенные в диссертации результаты получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Кроме непосредственной теоретической разработки методов, автор активно участвовал в их программной реализации и экспериментальной апробации, включая личное участие в проведении натуральных экспериментов, в том числе в морских условиях.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем работы – 90 страниц, включая 34 рисунка и список литературы из 91 наименования.

## Краткое содержание диссертации

Во **введении** освещается современное состояние рассматриваемых в диссертации проблем, обосновываются актуальность темы работы и ее практиче-

ская значимость, кратко излагается ее содержание, формулируются положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** диссертации разработан и экспериментально апробирован метод оценки мощности гауссова процесса, наблюдаемого на фоне импульсной помехи.

В §1.1 рассматривается одноточечная модель Тьюки импульсной помехи. Для определения дисперсии гауссовой компоненты предложено использовать метод аппроксимации гистограммы, являющийся модификацией метода минимума хи-квадрат: метод устойчивой аппроксимации.

В §1.2 проведен анализ точности различных вариантов предложенного метода в сравнении с методами, основанными на медианной фильтрации, а также границей Крамера–Рао. Показано, что предложенный метод в варианте с ограничением области аппроксимации и введением весов обладает точностью, близкой к границе Крамера–Рао.

В §1.3 рассматривается применение предложенного метода определения мощности гауссова процесса к задаче определения уровня подводного шума в инфразвуковом диапазоне частот с использованием горизонтальной антенной решетки. На рис. 1 приведены экспериментальные зависимости оценок текущей мощности принимаемого сигнала от времени для двух методов: предложенного метода устойчивой аппроксимации и выборочной дисперсии. Приведенные зависимости показывают высокую эффективность подавления реальной импульсной помехи с помощью метода устойчивой аппроксимации.

В §1.4 приведены выводы к главе 1.

Во **второй главе** диссертации с помощью метода максимального правдоподобия получены процедуры адаптивной обработки сигналов в антенных решетках при неизвестной матрице ковариации помехи. В случае, когда временная зависимость полезного сигнала известна с точностью до нескольких числовых параметров, показано, что задача имеет единственное решение, отличающееся от стандартной процедуры обработки сигналов в адаптивных

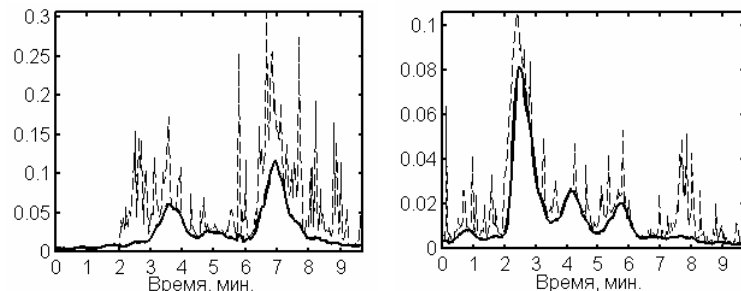


Рис. 1. Зависимости от времени оценки текущей дисперсии. Сплошная линия – оценка с помощью метода устойчивой аппроксимации по интервалу  $T$ , пунктир – оценка с помощью выборочной дисперсии по интервалу  $T_1 \approx T/10$ .

антенных решетках. Показано, что полученная процедура обладает меньшей дисперсией по сравнению с классической. В случае полностью неизвестной временной зависимости показано, что решение является не единственным. Предложен способ выбора решения на основе минимаксного критерия.

В §2.1 описывается модель принимаемого сигнала, а также производится вывод процедур адаптивной обработки сигналов в антенных решетках на основе метода максимума отношения сигнал/помеха (ОСП).

В §2.2 приведен вывод процедуры адаптивной обработки сигналов с помощью метода максимума правдоподобия для случая известной временной зависимости полезного сигнала. Представлены результаты численного моделирования для эквидистантной линейной антенной решетки в случае, когда полезный сигнал представляет собой плоскую волну в пространстве и радиоимпульс во времени, а неизвестным параметром является несущая частота. На рис. 2 приведены граница Крамера–Рао и СКО оценки частоты, полученные с помощью четырех процедур: (1) процедуры адаптивной обработки, полученной в диссертации, (2) классической процедуры адаптивного формирования диаграммы направленности, (3) процедуры, основанной на некогерентной пространственной обработке, (4) процедуры, соответствующей согласованной пространственной обработке (оптимальной для выбранного вида помехи). Как видно из рис. 2, процедуры (1), (3) дают результаты, близкие к границе Крамера–Рао, когда  $\text{SNR}_o > 20$  дБ. Напротив, использование процедуры (2) приводит к увеличению дисперсии оценки; различие между СКО и границей Крамера–Рао увеличивается по мере увеличения выходного ОСП,

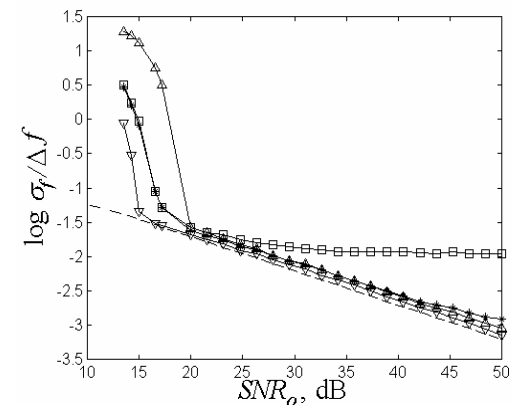


Рис. 2. Нормированное СКО оценки частоты  $s_f/\Delta f$  (логарифмический масштаб) в зависимости от выходного SNR для статистик (1) – \*, (2) –  $\mathbf{W}$ , (3) –  $\nabla$ , (4) –  $\mathbf{V}$  и граница Крамера–Рао (штриховая линия).

что и является итогом использования смещенной оценки матрицы ковариации помехи в классической адаптивной процедуре обработки сигналов.

В §2.3 с помощью метода максимального правдоподобия рассматривается случай неизвестной временной зависимости полезного сигнала. Для ее оценки получено уравнение, имеющее бесконечное число решений. С помощью минимаксного критерия предложен способ выбора единственного решения, которое совпадает с оценкой, использующей выборочную корреляционную матрицу. Получено выражение для смещения и среднего СКО оценки временной зависимости.

После подстановки оценки временной зависимости в функцию правдоподобия последняя перестает зависеть от пространственной компоненты сигнала. Для построения процедур оценки параметров, определяющих пространственный вид сигнала, например, пеленга полезного источника, введена дополнительная регуляризация функции правдоподобия, что позволило ввести определенный класс процедур адаптивного формирования диаграммы направленности; частными случаями процедур из этого класса являются известные оценки Кейпона первого и второго рода.

В §2.4 приведены выводы к главе 2.

В **третьей главе** диссертации развиты и исследованы методы оценки параметров полезного сигнала, наблюдаемого на фоне помех различного типа: (1) некоррелированной помехи с неизвестной меняющейся мощностью, (2) стационарной помехи с неизвестной спектральной плотностью мощности, (3) стационарной пространственно-временной помехи с неизвестной матрицей спектральных плотностей. Исключение неизвестных параметров помехи производилось путём поиска максимума функции правдоподобия по этим параметрам. Полученные для различных сценариев процедуры оценки имеют сходную структуру, включающую некоторое логарифмическое расстояние между наблюдаемыми данными и моделью полезного сигнала, кроме того, полученные процедуры достаточно универсальны. Поскольку полученные процедуры явно не включают параметры помехи и действуют как бы «вслепую», они были объединены названием «слепые» оценки по аналогии с тем, как, например, выполняется «слепая» эквалаизация (blind equalization) канала связи и т.п.

В §3.1 рассмотрена задача оценки параметров временного сигнала на фоне независимой помехи с меняющейся мощностью. Получено выражение для функции правдоподобия, инвариантное к неизвестной помехе (результат справедлив для произвольного распределения). Непосредственный поиск оценок параметров полезного сигнала, исходя из найденного выражения, невозможен, поскольку функция правдоподобия имеет больше одного глобального максимума. Для преодоления этой трудности предложена процедура регуляризации, приводящая к задаче с единственным решением. С помощью численного моделирования исследовано поведение регуляризованной процедуры в зависимости от величины параметра регуляризации для различных

распределений помехи. Рассматривался случай, когда полезный сигнал представляет собой постоянную величину, а неизвестным параметром является его амплитуда. Показано, что существует оптимальное значение параметра регуляризации, для которого достигается минимум СКО оценки; также показано, что чем «тяжелее» хвосты распределения помехи, тем ближе минимальное СКО оценки к границе Крамера–Рао. На основе связи оценки максимального правдоподобия для распределения Коши с регуляризованной «слепой» оценкой предложена процедура для выбора параметра регуляризации, дающая значения, близкие к оптимальным. Отдельно исследовано поведение «слепой» оценки при стремлении параметра регуляризации  $\epsilon$  к нулю. С помощью численного моделирования проведено сравнение чувствительности различных оценок к «загрязнениям», когда часть наблюдений принадлежит распределению с утяжеленными хвостами (модель Тьюки). На рис. 3 приведены зависимости дисперсий различных оценок от уровня «загрязнения»  $p$ , то есть доли «плохих» наблюдений. В качестве основного распределения бралось нормальное с дисперсией  $S^2 = 1$ , в качестве «загрязняющего» – распределение модуля нормальной величины с дисперсией  $S_p^2 = 100$ . В теории робастных оценок одним из основных параметров, по которому судят об устойчивости оценки, является пороговая точка – уровень «загрязнения», начи-

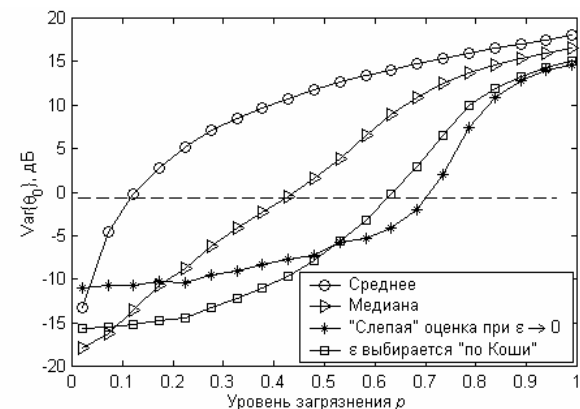


Рис. 3. Зависимость дисперсий оценки сдвига от уровня «загрязнения»  $p$  для модели Тьюки, в которой основным распределением является нормальное с единичной дисперсией, а «загрязняющим» – распределение модуля нормальной величины с дисперсией  $S_p^2 = 100$ . (о) – среднее; ( $\Delta$ ) – медиана, (\*) – «слепая» оценка при  $\epsilon \rightarrow 0$ , ( $\square$ ) – «слепая» оценка с использованием для выбора  $\epsilon$  выражения, соответствующего оптимальной оценке параметра масштаба распределения Коши.

ная с которого разброс оценки становится неприемлемым. Эмпирической оценкой этого уровня можно считать  $p_0$ , при котором дисперсия равна дисперсии одного «незагрязненного» наблюдения (на рис. 3 эта дисперсия  $S^2 = 1$  показана пунктирной прямой). Видно, что для «слепой» оценки при  $e \rightarrow 0$   $p_0 \approx 0.7$ , что является максимальным для четырех методов, приведенных на графике. В то же время в области не слишком больших «загрязнений» эта оценка обладает большей дисперсией, чем медиана. «Слепая» оценка, для которой параметр  $e$  выбирался с помощью предложенной процедуры («по Коши»), обладает несколько меньшей пороговой точкой, однако она более эффективна в области  $p < 0.5$ . Таким образом, вариант «слепой» оценки при  $e \rightarrow 0$  является наиболее устойчивым к сильным «загрязнениям» (в том числе несимметричным) исходного распределения.

В §3.2 рассмотрена задача оценки параметров временного сигнала на фоне стационарной помехи с неизвестной спектральной плотностью мощности (СПМ). Для функции правдоподобия получено выражение, не зависящее от неизвестной СПМ помехи, аналогичное (с точностью до замены временной области на частотную, а суммирования на интегрирование) полученному в §3.1. Для получения оценки неизвестных параметров, по аналогии с §3.1, введена регуляризация. Приведены результаты численного моделирования для случая, когда полезный ЛЧМ-сигнал с гауссовым профилем амплитуды наблюдается на фоне помехи, представляющей собой процесс авторегрессии пятого порядка, СПМ которого имеет острый пик в окрестности нулевой частоты. Показано, что СКО оценки амплитуды полезного сигнала близко к границе Крамера–Рао.

В §3.3 получена «слепая» оценка для случая, когда полезный сигнал наблюдается на фоне пространственно-временной стационарной помехи с неизвестной матрицей спектральных плотностей. Исследовано поведение полученной оценки для трёх сценариев. Первый сценарий соответствует «белой» помехе с постоянной СПМ, второй сценарий соответствует помехе с авторегрессионной СПМ из §3.2, третий сценарий соответствует помехе с СПМ, моделируемой «хаотическим» рядом непрерывных тональных сигналов. Показано, что в случае, когда СПМ помехи имеет значительное отличие от константы, СКО «слепой» оценки ближе к границе Крамера–Рао. Заметим, что все сценарии демонстрируют значительное улучшение качества оценки по сравнению с методом наименьших квадратов.

В §3.4 приведены выводы к главе 3.

В **четвертой главе** развиты и исследованы помехоустойчивые методы обработки пространственно-временных сигналов для двух гидроакустических приложений: (1) просветная локация, (2) траекторные измерения с использованием высокочастотного тонального источника.

В §4.1 рассматривается задача обнаружения и оценки параметров движения локализованной неоднородности, «освещаемой» ненаправленным источником непрерывного тонального сигнала; прием сигнала ведется линейной приемной решеткой, развернутой горизонтально. Рассматривается ситуация, когда траектория неоднородности проходит между излучателем и приемной решеткой (локация «на просвет»).

Для модели дифрагированного сигнала использовано приближение Кирхгофа для прямоугольного экрана с заменой спектра волновых чисел одним средним волновым числом. В этом приближении временная зависимость дифрагированного сигнала имеет вид импульса гауссовой формы с линейной частотной модуляцией.

Исследованы характеристики флуктуаций прямого сигнала, являющихся основной помехой наблюдению дифрагированного сигнала. Приведены характерные частотные и пространственные корреляционные характеристики. Показано, что угловое распределение флуктуаций прямого сигнала вне очень узкой полосы частот в окрестности нулевой частоты близко к изотропному, а временной спектр помехи с высокой точностью описывается процессом авторегрессии. Эти свойства помехи используются при получении конкретных процедур для оценки параметров движения неоднородности.

Для оценки общих параметров движения неоднородности, таких как момент пересечения трассы, предложены два помехоустойчивых метода. Первый (адаптивный) метод основан на оценке спектра помехи с помощью процесса авторегрессии, второй метод основан на использовании процедуры «слепой» оценки для случая пространственно-временного сигнала, наблюдаемого на фоне помехи с неизвестной матрицей взаимных спектральных плотностей (§3.3). Приведены результаты, полученные при применении предложенных процедур к данным озерных экспериментов. На рис. 4 приведены примеры выхода оценителя в зависимости от времени пересечения при обработке двух различных записей с помощью предложенных процедур. Приведенные примеры показывают, что два предложенных метода дают близкие результаты, однако «слепая» оценка не требует предварительного исследования помехи, разработки её статистической модели и соответствующей модельно-ориентированной оценки.

В §4.2 разработан метод определения траектории источника высокочастотного тонального сигнала, движущегося в мелком море относительно приемной антенной решетки на расстоянии, сопоставимом с глубиной места и длиной приемной решетки. Метод состоит из двух этапов: на первом этапе независимо определяются параметры траектории относительно отдельных гидрофонов; на втором этапе определяются параметры траектории относительно антенной решетки в целом. Первый этап основан на использовании зависимостей доплеровского сдвига частоты от времени, полученных путём оценки текущей частоты внутри временных окон, длина которых определяется временем корреляции мультипликативной помехи, вызванной рассеянием

сигнала на поверхностном волнении. Второй этап использует набор параметров, полученных на первом этапе, для определения параметров траектории относительно антенной решетки в целом. В случае, когда антенная решетка обладает заполненной апертурой (межэлементное расстояние не превышает

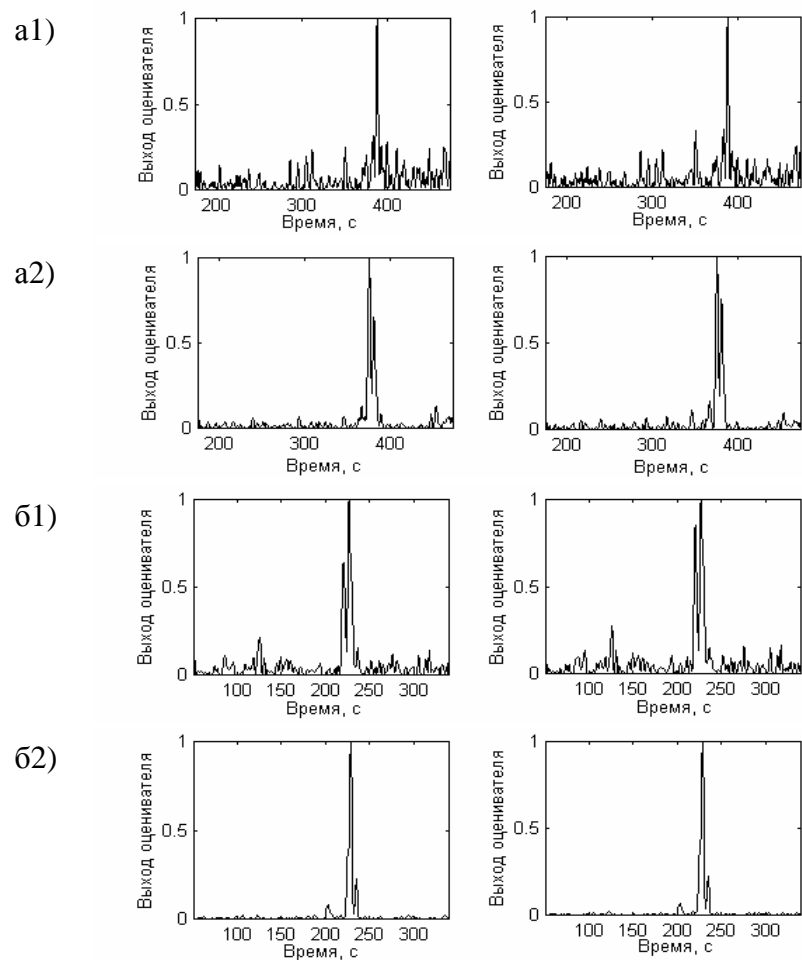


Рис. 4. Выходы оценителя в зависимости от момента пересечения для двух различных записей (а, б). Слева – метод адаптивной обработки на основе АР-модели помехи; справа – метод «слепой» оценки. Результаты для каждой из записей приведены для двух различных частот источника (1,2). Для записи (а) частоты 979.76 Гц и 1480.41 Гц, соответственно. Для записи (б) частоты 1480.41 Гц и 1981.05 Гц, соответственно.

половины длины волны), для определения параметров траектории на втором этапе используется также зависимость пеленга источника от времени. При использовании вертикальной антенной решетки учитывается искривление лучей в неоднородном волноводе, что повышает точность определения параметров. Аппроксимация зависимостей доплеровского сдвига и пеленга от времени производится с помощью помехоустойчивого метода «слепой» оценки (§3.1), что позволяет существенно уменьшить влияние выбросов, связанных с «неправильными» оценками частоты или пеленга. На рис. 5 приведен пример модельной аппроксимации экспериментальной зависимости доплеровского сдвига частоты с помощью метода наименьших квадратов (МНК) и с помощью метода «слепой» оценки. Видно, что присутствующие на зависимости выбросы приводят к неточному определению параметров траектории при использовании МНК, в то время как при использовании метода «слепой» оценки влияние выбросов практически отсутствует.

В §4.3 приведены выводы к главе 4.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

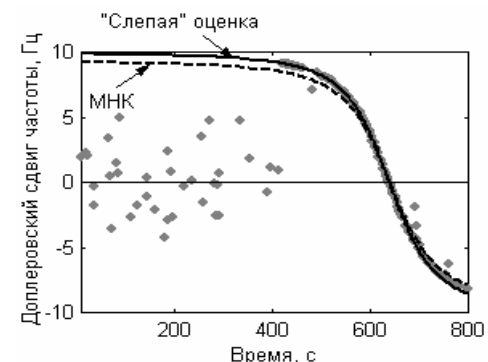


Рис. 5. Экспериментальная зависимость доплеровского сдвига частоты от времени (точки) и их аппроксимации с помощью «слепой» оценки и МНК (сплошная линия и пунктир, соответственно).

## Основные результаты диссертации

1. Разработана процедура оценки средней мощности гауссова процесса, наблюдаемого на фоне импульсных помех широкого класса. Предложенный метод является помехоустойчивой модификацией метода минимума хи-квадрат и назван «методом устойчивой аппроксимации». Показано, что предложенная оценка дает более высокую точность по сравнению с медианными оценками и близка к границе Крамера–Рао. Апробация предложенного метода на экспериментальных гидроакустических данных подтвердила его эффективность.



2. Предложены процедуры адаптивной обработки сигналов в антенных решетках при неизвестной матрице ковариации помехи, корректно учитывающие присутствие в имеющихся отсчетах полезного сигнала. Показано, что в случае, когда временная зависимость полезного сигнала известна с точностью до нескольких числовых параметров, полученная процедура имеет единственное решение. Показано, что полученная процедура обладает меньшей дисперсией по сравнению со стандартной процедурой обработки сигналов в адаптивных антенных решетках, игнорирующей присутствие полезного сигнала в обрабатываемом массиве данных. В случае полностью неизвестной временной зависимости показано, что решение является не единственным. Предложен способ выбора решения на основе минимаксного критерия. Получено выражение для точности оценки временной зависимости.
3. Для оценки параметров детерминированного пространственно-временного сигнала, наблюдаемого на фоне гауссовой помехи с неизвестным вторым моментом, предложены максимально-правдоподобные процедуры, инвариантные к неизвестной структуре помехи, и названные «слепыми» оценками по аналогии с процедурами «слепой» эквализации сигналов. Рассмотрены два конкретных сценария:
  - оценка параметров временного сигнала на фоне независимой помехи с меняющейся мощностью;
  - оценка параметров пространственно-временного сигнала на фоне стационарной помехи с неизвестной спектральной плотностью мощности.Показано, что процедура обработки, полученная для первого сценария, является оценкой максимального правдоподобия для широкого класса распределений независимых отсчетов помехи. С помощью численного моделирования показана высокая устойчивость полученной процедуры к выбросам. Для второго сценария показана высокая устойчивость предложенного метода к помехам со сложным спектром.
4. Предложены и экспериментально исследованы два помехоустойчивых метода определения параметров движения рассеивателя, пересекающего трассу между источником тональной акустической подсветки и горизонтальной приемной антенной решеткой, в условиях дальнего распространения в мелком море. Первый метод основан на использовании авторегрессионной оценки спектра помехи; второй метод, построенный на основе техники «слепых» оценок, пригоден для помех более широкого класса. Показано, что предложенные методы обладают примерно одинаковыми характеристиками, близкими к оптимальным, однако процедура на основе «слепой» оценки не требует предварительного исследования помехи и разработки её статистической модели.
5. Предложен и экспериментально исследован помехоустойчивый метод определения траектории высокочастотного тонального источника звука в

мелком море с использованием антенных решеток небольшой апертуры (единицы-десятки метров) при движении источника на расстояниях, сравнимых с глубиной места. Метод основан на использовании зависимостей доплеровского сдвига частоты и пеленга от времени. Для аппроксимации этих зависимостей использованы «слепые» оценки, нечувствительные к выбросам. Экспериментально показано, что предложенный метод позволяет определять траекторию при наличии помехи, связанной с некогерентным рассеянием сигнала на взволнованной поверхности.

### Список публикаций по теме диссертации

1. Родионов А.А. Модификация метода минимума хи-квадрат для пассивной локации в присутствии импульсной помехи // Труды X международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж, 2004, т. 1, с. 14–22.
2. Rodionov A.A., Turchin V.I. An adaptive parametric estimation of space-time deterministic signal against unknown Gaussian noise background // Proceedings of 4th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'03). Sevastopol, 2003, pp. 414–416.
3. Родионов А.А., Турчин В.И. Оценки дисперсии гауссового процесса, устойчивые к импульсной помехе // Изв. вузов. Радиофизика, 2005, т. 48, № 1, с. 76–85.
4. Родионов А.А., Турчин В.И., Адаптивная обработка сигналов в антенных решетках с использованием метода максимума правдоподобия // Изв. вузов. Радиофизика, 2008 (принята в печать).
5. Родионов А.А., Турчин В.И. Слепые оценки параметров сигналов // Труды X международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж, 2004, т. 1, с. 23–32.
6. Rodionov A.A. Turchin V.I. Blind estimation of target parameters in the presence of unknown Gaussian space-time interference // Proceedings of 5th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'05). Kyiv, 2005, pp. 351–354.
7. Матвеев А.Л., Орлов Д.А., Родионов А.А., Салин Б.М., Турчин В.И. Сравнительный анализ томографических методов наблюдения неоднородностей в условиях мелкого моря // Акустический журнал, 2005, т. 51, № 2, с. 1–12.
8. Родионов А.А., Турчин В.И. Оценка параметров сигнала, наблюдаемого на фоне помехи с ограниченным пространственным спектром. Препринт ИПФ РАН № 615. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2002. – 16 с.
9. Орлов Д.А., Родионов А.А. Томографические методы наблюдения движущихся подводных неоднородностей в мелководных условиях с помощью горизонтальной приемной антенны // Труды X международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж, 2004, т. 3, с. 1637–1647.
10. Родионов А.А. Определение траектории источника тонального сигнала с помощью антенной решетки в условиях мелкого моря // Труды научно-технической конференции «Проблемы метрологии гидрофизических измерений ПМГИ-2006», Москва, 2006, с. 53–58.
11. Орлов Д.А., Родионов А.А. Построение траектории тонального источника с использованием гидроакустических антенных решеток // Сборник трудов XIX сессии Российского акустического общества. т. 2. – М.: ГЕОС, 2007, с. 324–328.

### Оглавление диссертации

Введение.....	4
Глава 1. Оценка дисперсии гауссового процесса в присутствии импульсной помехи.....	19
§1.1. Модель импульсной помехи и оценка дисперсии гауссовой компоненты типа D-класса .....	21
§1.2. Сравнительный анализ точности оценок.....	26
§1.3. Применения метода к задаче определения уровня подводного шума .....	27
§1.4. Выводы.....	32
Глава 2. Адаптивная обработка сигналов в антенных решетках с использованием метода максимума правдоподобия .....	33
§2.1. Модели принимаемых сигналов; формирование ВВК по критерию ОСП.....	33
§2.2. Известный вид временной зависимости полезного сигнала .....	36
§2.3. Произвольная временная зависимость полезного сигнала .....	39
§2.4. Выводы.....	45
Глава 3. «Слепые» оценки параметров сигналов .....	46
§3.1. Случай независимых неравноточных отсчетов .....	47
3.1.1. Вывод выражения для функции правдоподобия.....	47
3.1.2. Регуляризованные оценки.....	49
3.1.3. Предельная регуляризация $\varepsilon \rightarrow 0$ .....	53
3.1.4. Исследование робастных свойств «слепых» оценок с помощью модели Тьюки.....	54
§3.2. Временной сигнал, наблюдаемый на фоне стационарного шума.....	56
§3.3. Пространственно-временной сигнал со стационарным шумом.....	58
§3.4. Выводы.....	60
Глава 4. Разработка и экспериментальная апробация помехоустойчивых методов обработки пространственно-временных сигналов для гидроакустических приложений .....	61
§4.1. Определение параметров цели в просветной локации.....	62
4.1.1. Схема просветной локации.....	62
4.1.2. Модель сигнала. Пространственная и временная структура помехи.....	64
4.1.3. Методы выделения полезного сигнала.....	69
4.1.4. Апробация методов оценки параметров движения цели на экспериментальных данных .....	71
§4.2. Определение траектории высокочастотного тонального источника звука в мелком море с использованием антенных решеток.....	75
4.2.1. Схема измерений. Метод определения траектории.....	75
4.2.2. Апробация методов определения траектории на экспериментальных данных .....	80
§4.3. Выводы.....	81
Заключение.....	82
Список литературы.....	84

Александр Алексеевич Родионов

**МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ, УСТОЙЧИВЫЕ  
К ПОМЕХАМ С НЕИЗВЕСТНЫМИ СВОЙСТВАМИ**

Автореферат

Ответственный за выпуск  
*А. А. Родионов*

Подписано к печати 1.09.2008 г.  
Формат 60 × 90 1/16. Бумага офсетная № 1.  
Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100 экз. Заказ № 91(2008).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН,  
603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46