

На правах рукописи

МАРЫЧЕВ Дмитрий Сергеевич

**АДАПТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛОВ С ФАЗОВОЙ И ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ**

Специальность 01.04.03 – радиоп физика

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород, 2013 г.

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении
высшего профессионального образования
«Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор
Фидельман Владимир Романович.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Мальцев Александр Александрович

кандидат физико-математических наук,
Вакс Владимир Лейбович

Ведущая организация: Самарский государственный аэрокосмический
университет им. академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский
университет)

Защита состоится « ____ » _____ 2013 г. в ____ часов на заседании
диссертационного совета Д 212.166.07 при Нижегородском университете им. Н.И.
Лобачевского по адресу: 603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. ____,
ауд. ____.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2013 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета

к.ф.-м.н., доцент

Черепенников В.В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации

Разработка и исследование методов оценки параметров радиосигналов является весьма общей задачей, не имеющей однозначного решения, как ввиду различных условий приема, так и ввиду разнообразия типов используемых сигналов и оцениваемых параметров. Данная задача нашла отражение в работах большого числа отечественных и зарубежных ученых: А.Н. Колмогорова, Н. Винера, В.А. Котельникова, Ю.Г. Сосулина, В.И. Тихонова, В.В. Шахгильдяна, Ф.М. Вудворда, Б. Гоулда, Л. Рабинера и многих других. В приложениях, связанных с радиосвязью, радионавигацией, а также с радиомониторингом окружающего пространства, можно выделить множество подзадач из которых к числу наиболее важных и имеющих широкое применение в современных системах можно отнести оценку характеристик источника радиоизлучения на основе анализа параметров и структуры используемых им сигналов, оценку его местоположения в пространстве. На основе набора параметров, полученных в результате решения данных задач, можно производить классификацию источников радиоизлучения.

Практическая реализация систем, позволяющих решать подобные задачи, опирается на методы и подходы, разработанные в теории оптимального приема. Однако, в условиях недостатка априорной информации относительно структуры анализируемого сигнала, что является характерным для задач радиомониторинга, применение ряда оптимальных методов оценки параметров сигналов, таких как оценки по максимуму апостериорной вероятности и минимальному среднеквадратичному отклонению, становится затруднительным. Наибольшее распространение в данном случае получил метод максимального правдоподобия, поскольку он опирается лишь на статистические характеристики шума, которые зачастую известны априорно или могут быть оценены с большой степенью достоверности.

К числу параметров сигналов, оценке которых посвящена диссертация, относится изменение во времени частоты и фазы сигнала, а также взаимная временная задержка распространения сигнала от источника до приемников, разнесенных в пространстве. Так, на основе анализа изменений частоты и фазы сигнала во времени можно определить тип принимаемого сигнала, а информация о взаимных временных задержках может быть использована для оценки местоположения источника излучения разностно-дальномерным методом.

Использование метода максимального правдоподобия в задаче оценки изменения частоты в пределах коротких во времени реализаций сигнала, может приводить к существенным погрешностям ввиду того, что его разрешение по частоте зависит от длительности анализируемого участка сигнала при обработке «скользящим окном». В таких случаях применяются различные интерполяционные методы, а также методы нелинейного спектрального анализа. Однако применение данных методов не всегда оправдано, так, интерполяционные

методы не позволяют в общем случае добиться улучшения частотного разрешения, а использование методов нелинейного спектрального анализа сопряжено с большим объемом «накладных расходов» при вычислении различных вспомогательных величин (например, отсчетов автокорреляционной функции). Кроме того, точность оценок, получаемых с помощью нелинейного спектрального анализа, ухудшается с уменьшением отношения сигнал/шум. Перспективным в данном случае является использование различного рода адаптивных методов, в частности, методов на основе принципа фазовой автоподстройки частоты. Вместе с тем, при анализе сигналов небольшой длительности (типичных, в частности, для систем связи с временным разделением доступа), важной задачей является достижение минимального времени вхождения в синхронизм таких схем.

Одним из распространенных методов решения задачи оценки взаимной временной задержки распространения сигнала является метод на основе расчета взаимной функции неопределенности. Данный метод позволяет получать оптимальные с точки зрения принципа максимального правдоподобия оценки, но характеризуется высокой вычислительной сложностью. В силу этого, целесообразность и эффективность применения данного метода в многоканальных системах цифровой обработки сигналов зависит от возможности его эффективной реализации.

Цели и задачи работы

Основной целью диссертации является разработка методов и алгоритмов оценки параметров сигналов для применения в многоканальных системах обработки данных. В связи с этим, данные алгоритмы должны быть вычислительно эффективными при их практической реализации на существующих аппаратных платформах и обеспечивать близкие к оптимальным оценки параметров.

В соответствии с целью в задачи работы входит разработка подхода к оценке частоты и фазы сигнала на основе принципа фазовой автоподстройки частоты и его адаптация к решению задачи оценки параметров сигналов с линейной частотной модуляцией, разработка алгоритмов демодуляции фазоманипулированных сигналов на основе предложенного подхода, а также разработка эффективного метода расчета функции неопределенности, применительно к задаче оценки взаимной временной задержки распространения сигнала и исследование влияния шума и типа сигнала на качество оценки.

Методы исследований

Для решения поставленных задач использовались методы статистической радиофизики, математической статистики и теории вероятностей, а также компьютерное моделирование. Компьютерное моделирование включало в себя реализацию предложенных алгоритмов и ряда известных аналогов с использованием современных методов и средств параллельных вычислений с применением графических процессоров и многоядерных процессоров общего назначения.

Научная новизна

В диссертации предложен и исследован метод оценки изменения частоты и фазы сигнала, использующий принцип фазовой автоподстройки частоты. Предложен и исследован оригинальный алгоритм оценки параметров и сигналов с линейной частотной модуляцией. На основе предложенного подхода разработаны и исследованы алгоритмы демодуляции фазоманипулированных сигналов. Представлен оригинальный подход к вычислению функции неопределенности применительно к задаче оценки взаимной временной задержки распространения сигнала.

Научная и практическая значимость результатов

Практическая значимость результатов, полученных в диссертации, состоит в разработке новых алгоритмов оценки параметров сигналов, эффективных с точки зрения оптимальности получаемых с их помощью оценок, и практической реализации. Предложен оригинальный метод расчета функции неопределенности для задачи оценки взаимной временной задержки распространения сигнала, обладающий большей производительностью по сравнению с известными методами. Представленные в работе алгоритмы предназначены для применения в многоканальных системах цифровой обработки сигналов, классификации и определения характеристик источников радиоизлучения.

Обоснованность и достоверность

Достоверность результатов, представленных в диссертации, подтверждается их воспроизводимостью в многократных численных экспериментах, сравнением с опубликованными ранее результатами. Обоснованность выводов и положений, сформулированных в диссертации, подтверждается их непротиворечивостью с известными в литературе положениями, а также их неоднократным обсуждением на всероссийских и международных конференциях.

Основные положения, выносимые на защиту

- Подход к оценке частоты и фазы сигнала на основе использования цифрового фильтра с адаптируемыми параметрами, реализующего принцип фазовой автоподстройки частоты.
- Алгоритм оценки параметров сигналов с линейной частотной модуляцией, разработанный на основе предложенного подхода.
- Адаптивные алгоритмы демодуляции фазоманипулированных сигналов, реализующие цифровую фильтрацию с фазовой подстройкой в условиях априорной неопределенности относительно значения несущей частоты сигнала.
- Метод эффективной реализации вычисления функции неопределенности применительно к задаче оценки взаимной временной задержки распространения сигнала на основе операций матричного умножения.
- Результаты исследования характеристик методов и алгоритмов, предложенных в работе применительно к задачам обработки сигналов различных типов в присутствии шумов.

Апробация результатов

Основные результаты диссертационной работы отражены в 15 публикациях, среди них 4 статьи в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК [1 - 4].

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях:

- Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение», Москва ИПУ РАН, 2009, 2010 и 2011 гг.
- «4th International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems» Санкт-Петербург, 2012 г.
- Молодежной научно-технической конференции «Будущее технической науки», Нижний Новгород, 2009 г.
- «Всероссийской Научной Конференции Студентов-Физиков ВНКСФ-15 », Кемерово, 2009 г.
- Всероссийской научно-технической конференции Информационные системы и технологии», Нижний Новгород, 2010, 2011, 2012 гг.
- V Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь», Москва, 2011 г.
- Научной конференции по радиофизике, Нижний Новгород, 2012, 2013 гг.

Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие в постановке задач, проведении необходимых расчетов и компьютерного моделирования, а также в обсуждении и интерпретации результатов. Выбор направления исследований и обсуждение полученных результатов проводилось совместно с научным руководителем – заведующим кафедрой ИТФИ физического факультета ННГУ, д.т.н., профессором В.Р. Фидельманом, профессором кафедры ИТФИ, д.ф.-м.н. О.А. Морозовым, доцентом кафедры ИТФИ, к.ф.-м.н. А.А. Логиновым, с.н.с. НИФТИ ННГУ, к.ф.-м.н. С.Л. Хмелёвым. Аналитические и численные расчеты, разработка и реализация алгоритмов, а также модельное программное обеспечение предложенных алгоритмов выполнены лично автором.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, приложения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 128 страниц. Диссертация включает 51 рисунок и список литературы из 106 наименований.

Краткое содержание диссертации

Во **введении** рассмотрена актуальность разработки методов и алгоритмов оценки параметров сигналов, сформулированы основные цели и задачи диссертации, приводятся сведения об апробации работы, основные положения, выносимые на защиту, кратко излагается содержание диссертации.

В **первой главе** представлен обзор известных методов оценки параметров сигналов и слежения за их изменениями во времени. Основное внимание

уделяется методам оценки частоты и взаимной временной задержки распространения сигнала.

В разделе 1.1 рассмотрен общий подход к построению оптимальных оценок параметров сигналов. Рассмотрена обобщенная модель сигнала, поставлена в общем виде задача оценки его параметров. Представлены выражения для оценок по максимуму апостериорной вероятности и минимальному среднеквадратичному отклонению (байесовские оценки).

В разделе 1.2 рассмотрен случай применения байесовских оценок в случае отсутствия априорной информации, приводящий к оценкам по методу максимального правдоподобия. Формулируется общее выражение для функции правдоподобия для случая шума с гауссовским распределением вероятностей. Представлено выражение для оценки частоты сигнала со случайной начальной фазой по методу максимального правдоподобия, показана его связь с периодограммной оценкой спектра. Рассмотрена задача оценки взаимной временной задержки распространения сигнала со случайной начальной фазой и известной частотой, приводящая к понятию корреляционного интеграла показан переход к параметрической корреляционной функции – функции неопределенности, приведен ряд ее основных свойств.

В разделе 1.3 рассмотрены известные подходы к повышению разрешающей способности оценок частоты сигнала в условиях небольшой длительности выборок для анализа. Рассмотрены интерполяционные методы повышения разрешения по частоте, которые обладают рядом полезных свойств, но вместе с тем, не позволяют получить сверхразрешения, компенсируя лишь погрешности, связанные с переходом к дискретизованному представлению сигналов. Представлены методы нелинейного спектрального анализа, основанные на анализе собственных чисел и собственных векторов автокорреляционной матрицы сигнала. В частности, рассматриваются метод гармонического разложения Писаренко, MUSIC, EV, а также методы на основе так называемой «подгонки подпространства» (subspace fitting).

В разделе 1.4 обсуждаются известные подходы к слежению за изменениями частоты сигнала, актуальные в задачах технического анализа сигналов в условиях неконтролируемого доплеровского смещения частоты (характерных для систем навигации и радиосвязи, использующих космический сегмент), а также нестационарных сигналов. Обсуждаются возможности применения методов, основанных на обработке небольших выборок сигнала в скользящем окне с применением известных методов оценки спектральных или псевдоспектральных характеристик, а именно методов максимального правдоподобия и нелинейного спектрального анализа. Также рассмотрены схемы фазовой автоподстройки частоты применительно к задаче слежения за изменениями частоты и фазы сигнала. Представлены основные характеристики типовых систем фазовой автоподстройки частоты, описаны режимы их функционирования.

В разделе 1.5 приводится краткое заключение по результатам, полученным в первой главе, сделан вывод об актуальности разработки вычислительно

эффективных методов и алгоритмов оценки параметров сигналов для применения в многоканальных системах цифровой обработки данных.

Во **второй главе** диссертации представлен адаптивный алгоритм оценки параметров сигналов, использующие принцип фазовой автоподстройки частоты.

В разделе 2.1 рассмотрена обобщенная схема оценки параметров сигналов на основе цифрового адаптивного фильтра (рис. 1). На рисунке $s[n]$ обозначает входной сигнал, $h_{f,\varphi}[n,k]$ - импульсная характеристика фильтра (свертка производится по индексу k , индекс n является параметром), $x[n]$ - сигнал на выходе фильтра, $f_c[n]$ и $\varphi_c[n]$ - частота и фаза, соответственно - параметры фильтра, $e[n]$ - ошибка, зависящая от рассогласования частот и фаз сигнала и фильтра. Для большого числа задач, связанных с обработкой радиосигналов, целесообразно применять фильтр с импульсной характеристикой вида:

$$h_{f,\varphi}[n, k] = \frac{1}{p} \exp(i2\pi f_c[n]k + i\varphi_c[n]), \quad 0 \leq k \leq p-1, \quad (1)$$

где p - число отсчетов фильтра. Проведена аналогия со схемой фазовой автоподстройки частоты, показаны сходства и различия. Детально рассмотрен процесс формирования сигнала ошибки, использующегося для регулирования параметров схемы.

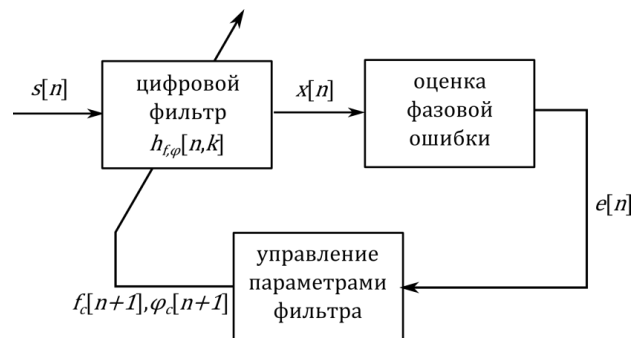


Рис. 1. Схема адаптивной оценки параметров сигналов на основе цифрового фильтра с адаптируемыми параметрами.

Показана аналитически связь алгоритма формирования ошибки с полосой захвата синхронного режима по частоте, указана область значений частотного рассогласования между схемой и входным сигналом, при которых возможно достижение синхронного режима. Рассмотрен алгоритм подстройки параметров схемы, цель которого состоит в компенсации рассогласования полных фаз между схемой и входным сигналом

$$\varphi_c[n] = \varphi_c[n-1] + 2\pi f_c[n-1] - \alpha e[n-1], \quad f_c[n] = f_c[n-1] - \beta 2\pi e[n-1]. \quad (2)$$

Данный алгоритм характеризуется двумя коэффициентами (α и β), влияющими на величину шага подстройки по частоте и фазе, от выбора которых зависит время захвата синхронного режима. Область изменения значений коэффициентов, гарантирующих устойчивость схемы, а также их теоретически оптимальные значения, позволяющие получить минимальное время переходного процесса в данной схеме, получены исходя из анализа предложенной схемы в линейном приближении. Проведено сравнение теоретических оценок

оптимальных значений параметров алгоритма подстройки со значениями, полученными экспериментально.

В разделе 2.2 представлены результаты исследования статистических характеристик предложенного подхода в условиях аддитивного шума. Целью исследования являлась оценка погрешностей измерения частоты и фазы сигнала, в зависимости от уровня шума. Исследование проводилось путем компьютерного моделирования, поскольку применение традиционных подходов к исследованию подобных систем, основанных, в частности, на решении стохастических дифференциальных уравнений в данном случае оказалось затруднительным.

В результате моделирования были получены плотности распределения вероятностей фазового и частотного рассогласований от величины отношения сигнал/шум (рис. 2), а также зависимости дисперсии фазового рассогласования от величины отношения сигнал/шум. Представлено сравнение с известной схемой Костаса.

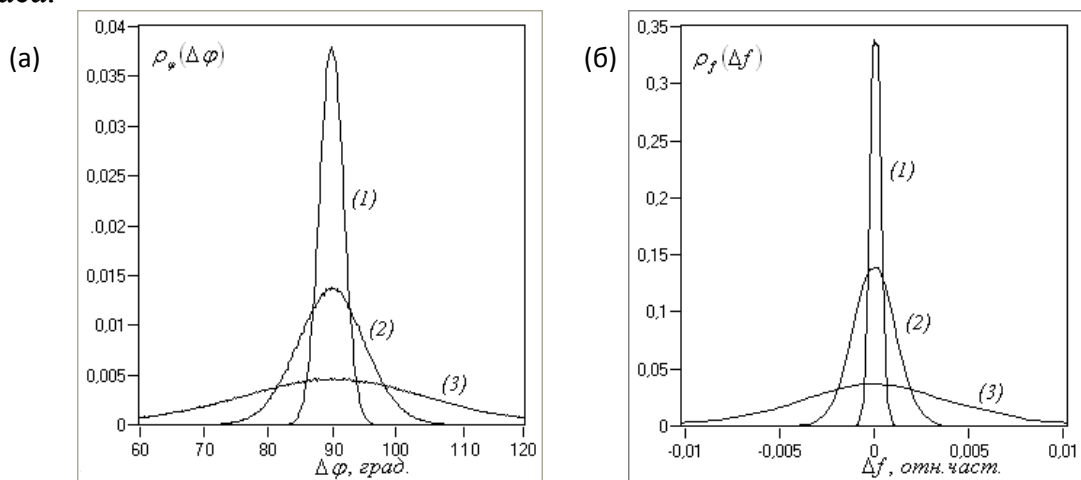


Рис. 2. Плотности распределения вероятностей фазового (а) и частотного (б) рассогласования сигнала и схемы при следующих значениях отношения сигнал-шум: +15 дБ (1), +6 дБ (2), -3 дБ (3).

В разделе 2.3 представлена модификация предложенной схемы, заключающаяся в переходе от случайного шага подстройки частоты и фазы к фиксированному, направление которого определяется знаком ошибки.

$$\begin{aligned} \varphi_c[n] &= \varphi_c[n-1] + 2\pi f_c[n-1] - \text{sign}(e[n-1])\alpha', \\ f_c[n] &= f_c[n-1] - \text{sign}(e[n-1])2\pi\beta'. \end{aligned} \quad (3)$$

Целью данной модификации является предотвращение случайных срывов синхронизации за счет неконтролируемого кратковременного роста значения ошибки вследствие влияния шума. Представлены результаты исследования зависимости времени захвата синхронного режима от отношения сигнал/шум и начального частотного рассогласования. Показано, что захват синхронного режима модифицированной схемой возможен в значительно более широком диапазоне начальных расстроек по частоте по сравнению с исходной схемой, кроме того, время захвата синхронного режима меньше во всем исследованном диапазоне шумов (рис. 3).

В разделе 2.4 рассмотрено применение предложенной схемы в задаче слежения за частотой сигнала на примере демодуляции сигналов с линейной

частотной модуляцией. Представлены результаты демодуляции сигналов с линейной частотной модуляцией в условиях аддитивного шума. Отмечается особенность предложенного подхода, состоящая в ограниченности диапазона значений начального частотного рассогласования, при которых возможно достижение синхронного режима, и предлагается использовать начальную грубую настройку схемы на частоту сигнала. В данном разделе также предлагается подход к определению типа сигналов с линейной частотной модуляцией и прецизионной оценки их параметров на основе построения модели изменения частоты. Выделяются сигналы с восходящим, нисходящим, V- и Λ-образным изменением частоты. Модель изменения частоты представляет собой два прямолинейных участка, точка пересечения которых находится в пределах выборки сигнала. Оценка параметров модели производится путем решения задачи оптимизации, основу которой составляет метод наименьших квадратов.

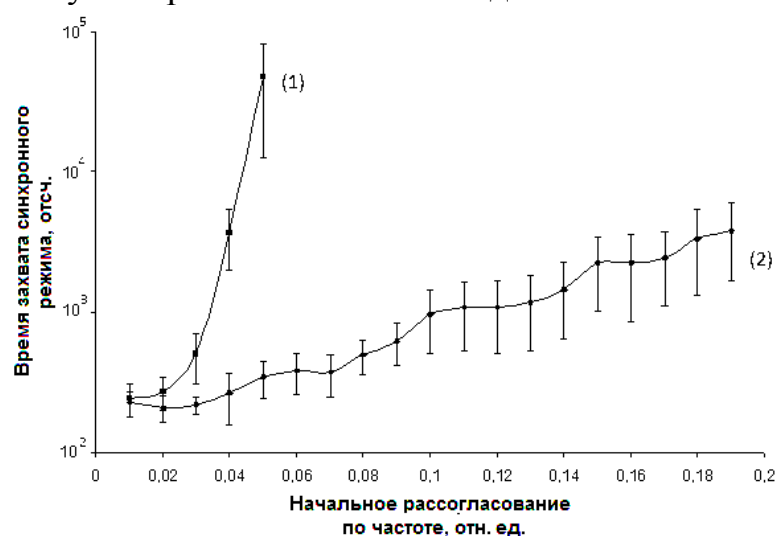


Рис. 3. Зависимость времени захвата синхронного режима от величины начального частотного рассогласования для исходной (линия 1) и модифицированной (линия 2) схем.

В разделе представлены результаты исследования зависимости вероятности правильного определения типа сигнала от величины отношения сигнал/шум. Также представлены результаты исследования зависимости среднеквадратичного отклонения оценки девиации частоты сигнала с линейной частотной модуляцией, проведено сравнение результатов с алгоритмом на основе применения быстрого преобразования Фурье в скользящем окне.

В разделе 2.5 рассмотрено применение предложенной схемы в задаче демодуляции фазоманипулированных сигналов. Отмечаются ограничения применимости схем фазовой автоподстройки частоты и их аналогов в задачах демодуляции фазоманипулированных сигналов, состоящие во влиянии содержащейся в сигнале информационной составляющей на процесс подстройки и делающих практически невозможным достижение синхронного режима. Представлены рекомендации по выбору импульсной характеристики фильтра, пригодной для обработки фазоманипулированных сигналов, а также сформулирован общий подход к формированию сигнала ошибки, предусматривающий исключение из него мешающей информационной компоненты. В данном разделе предложены схемы, пригодные для демодуляции

сигналов с двух- и четырехпозиционной фазовой манипуляцией, а также универсальная схема для демодуляции в общем случае сигналов с М-позиционной манипуляцией. Представлены результаты исследования помехоустойчивости предложенных схем и проведено сравнение с известными аналогами (рис. 4).

На рис. 4 линия 1 получена для предложенного подхода в случае использования алгоритма подстройки (1), линия 2 получена для предложенного подхода и использования алгоритма подстройки (2). Линия 3 получена для схемы Костаса. Линия 4 представляет собой оценку вероятности ошибки оптимального некогерентного приема двухпозиционного фазоманипулированного сигнала.

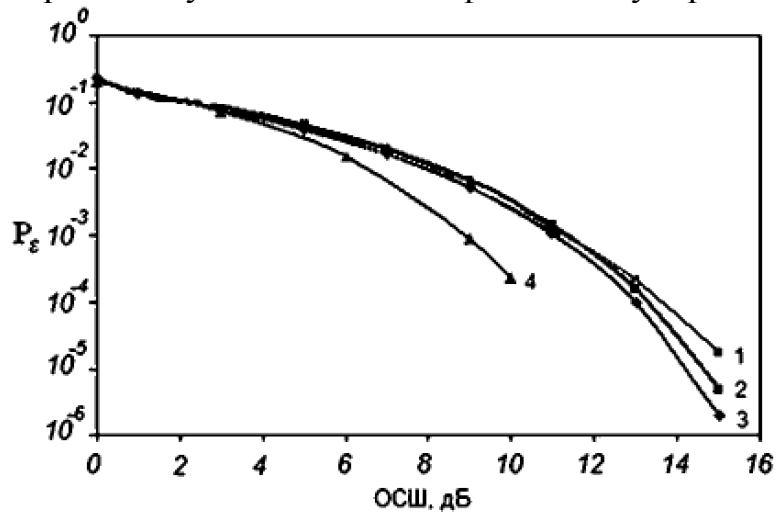


Рис. 4. Графики зависимости вероятности битовой ошибки демодуляции ФМ2.

В разделе 2.6 приводится краткое заключение по результатам, полученным во второй главе. Показано, что применение алгоритма оценки параметров сигналов с линейной частотной модуляцией позволяет получить существенное повышение точности по сравнению с алгоритмом, основанном на применении быстрого преобразования Фурье в скользящем окне. Также показано, что применительно к задаче демодуляции фазоманипулированных сигналов, помехоустойчивость алгоритмов, предложенных в данной главе, практически идентична помехоустойчивость известных схем, в частности, схемы Костаса.

Третья глава диссертации посвящена решению задачи оценки взаимной временной задержки распространения сигнала применительно к задаче определения местоположения источников радиоизлучения.

В разделе 3.1 представлена общая постановка задачи оценки местоположения объектов разностно-дальномерным методом. Кратко обсуждается вопрос относительно влияния пространственной конфигурации приемных позиций на точность оценки местоположения. Проводится сравнительный анализ результатов применения преобразования Вигнера-Виля и функции неопределенности в задаче оценки взаимной временной задержки фазоманипулированного сигнала. Показано, что наилучшим образом для рассматриваемой задачи подходит использование функции неопределенности.

$$Q(n, m) = \sum_{k=0}^{N_0-1} s_0[k] s_1^*[k-n] \exp\left(-i \frac{2\pi k m}{N_0}\right), \quad (4)$$

где $s_0[k]$ и $s_1[k]$ - отсчеты сигналов, принятых по различным каналам, n и m - индексы взаимной временной задержки и частотного сдвига, N_0 - число отсчетов сигнала $s_0[k]$.

В данном разделе отмечена основная проблема, возникающая при практическом применении функции неопределенности, связанная с высокой вычислительной сложностью. В условиях жестких ограничений на длительность процессов обработки сигналов актуальной является задача оптимизации производительности вычисления функции неопределенности.

В разделе 3.2 представлены известные способы вычисления функции неопределенности, в частности, подходы на основе быстрого преобразования Фурье, корреляционный подход и подход на основе фильтрации. Приведены аналитические выражения, описывающие данные методы, а также оценки их вычислительной сложности. Отмечается, что применение быстрого преобразования Фурье, не является единственным способом сокращения времени расчета. Предлагается метод вычисления функции неопределенности, основу которого составляет параллельный алгоритм умножения матриц сигналов:

$$\hat{\mathbf{P}} = \hat{\mathbf{S}}_0 \hat{\mathbf{S}}_1^H, \quad (5)$$

где матрицы $\hat{\mathbf{S}}_0$ и $\hat{\mathbf{S}}_1$ составлены из отсчетов обрабатываемых сигналов следующим образом

$$\hat{\mathbf{S}}_0 = \begin{pmatrix} s_0[0] & \cdots & s_0[d-1] \\ s_0[d] & \cdots & s_0[2d-1] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_0[N_0-1-d] & \cdots & s_0[N_0-1] \end{pmatrix}, \hat{\mathbf{S}}_1 = \begin{pmatrix} s_1[0] & \cdots & s_1[d-1] \\ s_1[d] & \cdots & s_1[2d-1] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_1[N_0-1-d] & \cdots & s_1[N_0-1] \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где d - шаг децимации.

Таким образом, матрица $\hat{\mathbf{P}}$ будет содержать значения последовательности $\tilde{r}_n[k] = s_0[k]s_1^*[k-n]$ (4) одновременно для всех значений индекса задержки n . Предложенный метод использует децимацию входных данных, а значит, пригоден в общем случае для узкополосных сигналов и небольших (по сравнению с частотой дискретизации) значений доплеровского сдвига частоты. Уменьшение точности оценки взаимной временной задержки, связанное с децимацией, может быть компенсировано путем более детального расчета функции неопределенности для сравнительно небольшого диапазона задержек одним из известных методов.

В разделе 3.3 предложена модификация метода вычисления функции неопределенности, основанная на применении преобразования Вигнера-Вилля вместо преобразования Фурье в исходном выражении:

$$Q'(n, m) = \sum_{l=0}^{L-1} \tilde{r}_n^*[l] \tilde{r}_n[L-l-1] \exp\left(-i \frac{2\pi d m l}{N_0}\right). \quad (7)$$

Модифицированная функция неопределенности, сохраняя корреляционные свойства традиционной функции неопределенности, характеризуется нелинейным преобразованием и позволяет получить оценки взаимной временной задержки и доплеровского сдвига частоты, обладающие большим разрешением.

В разделе 3.4 представлены результаты компьютерного моделирования работы предложенного алгоритма в задаче оценки взаимной временной задержки распространения сигналов с цифровой модуляцией, в частности фазо- и частотноманипулированных. Введен критерий S качества оценки взаимной временной задержки, характеризующий степень выраженности корреляционного пика. Критерий качества оценки взаимной временной задержки (рис. 5) в случае фазоманипулированных сигналов существенно выше, чем в случае частотноманипулированных.

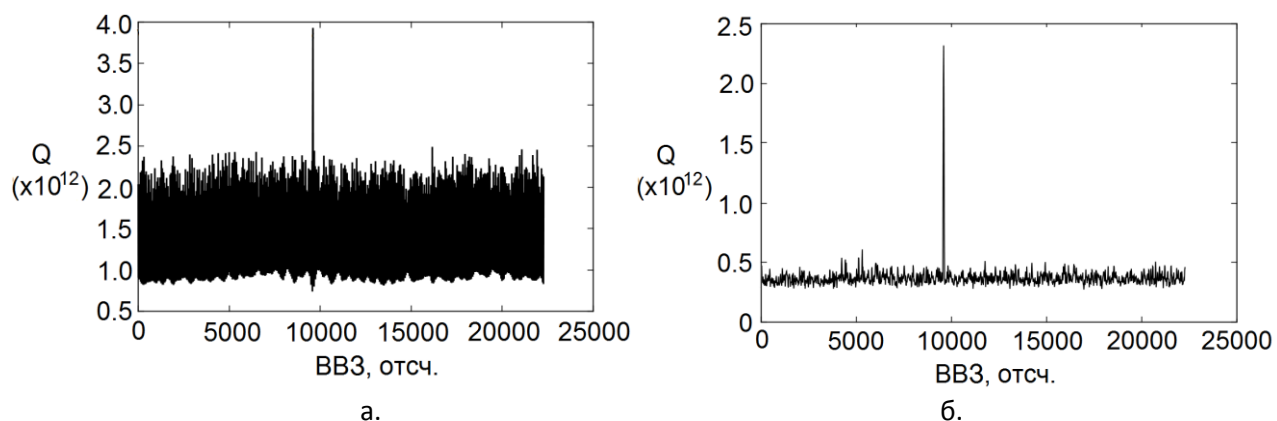


Рис. 5. Зависимости максимального значения модуля функции неопределенности от величины задержки для частотноманипулированного (а) и фазоманипулированного (б) сигналов при ОСШ +15 дБ.

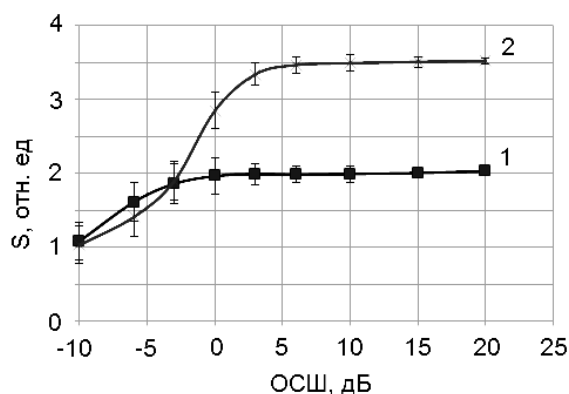


Рис. 6. Зависимости значения S для исходной (линия 1) и модифицированной функции (линия 2) неопределенности от ОСШ для и двухпозиционного частотноманипулированного сигнала.

Использование модифицированной функции неопределенности позволяет повысить качество оценки взаимной временной задержки для частотноманипулированных сигналов (рис. 6) за счет большей выраженности корреляционного пика.

В разделе также представлены результаты исследования производительности предложенного подхода на примере его реализации на графическом процессоре с использованием технологии параллельных вычислений NVIDIA CUDA. Приведены результаты сравнения производительности данной реализации с известными аналогами, в том числе, использующими графические

процессоры и современные многоядерные процессоры общего назначения (табл. 1). Параметр N_1 соответствует числу отсчетов сигнала s_1 .

В разделе 3.5 приводится краткое заключение по результатам, полученным в третьей главе. Показано, что применение преобразования Вигнера-Виля вместо преобразования Фурье в выражении для функции неопределенности позволяет получить более высокое значение критерия качества оценки взаимной временной задержки для частотноманипулированных сигналов. Применение предложенного метода расчета функции неопределенности позволяет существенно сократить время вычислений по сравнению с известными подходами.

Таблица 1.

Сравнение производительности алгоритмов вычисления функции неопределенности

N_1	d	Реализация на процессоре общего назначения.		Предложенный алгоритм
		CUFFT БПФ	IPР БПФ	
300000	8	1756 мс	643 мс	296 мс
100000	60	676 мс	372 мс	46 мс
96000	30	630 мс	245 мс	40 мс
50000	14	370 мс	136 мс	35 мс
48000	15	326 мс	90 мс	30 мс
32000	9	247 мс	90 мс	30 мс

В заключении сформулированы основные результаты диссертации и следующие из них выводы.

В приложении приведен обзор возможностей применения современных графических процессоров в задачах цифровой обработки сигналов. В качестве примера рассмотрена реализация демодулятора частотноманипулированных сигналов на основе селективных фильтров. Отмечаются характерные особенности графических процессоров, показано сходство с цифровыми сигнальными процессорами, и, как следствие, перспективность их использования для задач цифровой обработки сигналов. На примере двух реализаций демодулятора на графическом процессоре, а также аналогичной реализации с использованием многоядерного процессора общего назначения показаны основные факторы, влияющие на производительность реализаций алгоритмов, использующих графические процессоры.

Основные результаты диссертации

- Предложен подход к оценке частоты и фазы сигнала на основе цифрового фильтра с адаптируемыми параметрами, использующий принцип фазовой автоподстройки частоты, позволяющий получить оценки фазы и частоты сигнала близкие к оптимальным, обладая при этом существенно более простой структурой по сравнению с существующими алгоритмами.
- На основе предложенного подхода разработан алгоритм оценки параметров сигналов с линейной частотной модуляцией, характеризующийся большей точностью по сравнению с известными алгоритмами линейного частотно-временного спектрального оценивания.
- Разработаны алгоритмы, позволяющие решать задачу демодуляции многопозиционных фазоманипулированных сигналов, использующие цифровую фильтрацию и принцип фазовой автоподстройки частоты.
- Разработан эффективный метод расчета функции неопределенности применительно к задаче оценки взаимной временной задержки распространения сигнала, использующий операции матричного умножения и характеризующийся существенно большей производительностью по сравнению с известными алгоритмами расчета функции неопределенности.

Список работ по теме диссертации

- 1 Логинов А.А., Марычев Д.С., Морозов О.А., Хмелев С.Л. Схема фазовой автоподстройки частоты на основе цифрового фильтра с адаптируемыми параметрами // «Радиотехника и электроника». М.: 2012. Т. 57, № 11. С. 1193-1198.
- 2 Марычев Д.С., Морозов О.А., Хмелев С.Л. Методика оценки параметров ЛЧМ сигналов на основе цифровой адаптивной фильтрации [Электронный ресурс] / «Журнал радиотехники». М.:2012. №3. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/mar12/3/text.pdf>, свободный.
- 3 Марычев Д.С., Морозов О.А., Хмелев С.Л. Фидельман В.Р. Применение адаптивной фильтрации в задаче демодуляции многопозиционных фазоманипулированных сигналов // «Известия вузов. Радиофизика». Н.Новгород: 2012. Т. LV, №9. С. 634-640.
- 4 Логинов А.А., Марычев Д.С., Морозов О.А., Фидельман В.Р. Алгоритм вычисления функции неопределенности в задаче одновременной оценки частотно-временных характеристик сигналов // «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион». Пенза: 2013. №3(27). С. 62-73.
- 5 Логинов А.А., Марычев Д.С., Морозов О.А., Хмелев С.Л. Модификация цифровой схемы Костаса // Труды РНТОРЭС им. А.С. Попова. Серия Цифровая обработка сигналов и ее применение. Выпуск XXI. М.: 2009. С. 340-342.
- 6 Логинов А.А., Марычев Д.С., Морозов О.А., Хмелев С.Л. Исследование статистических характеристик полностью цифровой схемы фазовой автоподстройки частоты на основе комплексного сверточного фильтра с подстраиваемыми параметрами // Труды РНТОРЭС им. А.С. Попова. Серия Цифровая обработка сигналов и ее применение. Выпуск XXII. М.: 2010. С. 30-32.
- 7 Логинов А.А., Марычев Д.С., Морозов О.А., Хмелев С.Л. Схема фазовой автоподстройки частоты на основе цифрового фильтра в задачах обработки ФМ2 и ФМ4 сигналов // Труды РНТОРЭС им. А.С. Попова. Серия Цифровая обработка сигналов и ее применение. Выпуск XXIII-2. М.: 2011. С. 34-37.
- 8 Логинов А.А., Марычев Д.С., Хмелев С.Л. Схема фазовой автоподстройки частоты на основе цифровой адаптивной фильтрации // Тезисы VIII молодежной научно-технической конференции «Будущее технической науки». Н.Новгород: 2009. С. 19.
- 9 Логинов А.А., Марычев Д.С., Хмелев С.Л. Цифровая адаптивная фильтрация в задаче фазовой автоподстройки частоты // Тезисы пятнадцатой «Всероссийской Научной Конференции Студентов-Физиков ВНКСФ-15 ». Кемерово: 2009. С. 670.
- 10 Марычев Д.С., Хмелев С.Л. Алгоритм адаптивной коррекции параметров блока подстройки цифровой схемы ФАПЧ // Материалы всероссийской

- научно-технической конференции Информационные системы и технологии ИСТ-2010. Н.Новгород: 2010. С. 30-31.
- 11 Марычев Д.С., Хмелев С.Л. Схема ФАПЧ на основе цифрового фильтра в задаче обработки ЛЧМ сигналов // Материалы всероссийской научно-технической конференции Информационные системы и технологии ИСТ-2011. Н.Новгород: 2011. С. 64.
 - 12 Марычев Д.С., Морозов О.А., Хмелев С.Л. Методика оценки параметров ЛЧМ сигналов на основе цифровой адаптивной фильтрации // Доклады V Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь». М.:2011. С. 406-408.
 - 13 Марычев Д.С., Морозов О.А., Хмелев С.Л. Квазикогерентный алгоритм демодуляции многопозиционных фазоманипулированных сигналов // Материалы всероссийской научно-технической конференции Информационные системы и технологии ИСТ-2012. Н.Новгород:2012. С. 26.
 - 14 Марычев Д.С., Морозов О.А., Хмелев С.Л. Метод построения демодуляторов фазоманипулированных сигналов на основе цифровой адаптивной фильтрации // Труды шестнадцатой научной конференции по радиофизике. Н.Новгород: 2012. С.133.
 - 15 Loginov A.A., Marychev D.S. Universal algorithm for demodulating multi-position PSK signals // Proceedings of 4th International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems. St. Petersburg: 2012. С. 431-434.

Введение	4
1. Методы оценки параметров сигналов и слежения за их изменениями. 14	
1.1.Оптимальные оценки параметров сигналов.....	14
1.2.Учет априорной информации. Метод максимального правдоподобия.....	16
1.3.Методы повышения разрешающей способности по частоте	28
1.4.Методы слежения за изменениями параметров сигналов	37
1.5.Выводы.....	48
2. Адаптивные алгоритмы оценки параметров сигналов	51
2.1.Алгоритм оценки параметров сигналов на основе цифрового фильтра с адаптируемыми параметрами	51
2.2.Исследование статистических характеристик предложенного подхода в условиях аддитивных шумов	59
2.3.Применение предложенного подхода к анализу сигналов небольшой длительности в условиях априорной неопределенности относительно их параметров	63
2.4.Слежение за частотой сигнала на примере оценки параметров сигналов с линейной частотной модуляцией	67
2.5.Демодуляция фазоманипулированных сигналов.....	72
Выводы.....	80
3. Оценка взаимной временной задержки распространения сигнала в задаче оценки местоположения источников радиоизлучения.....	82
3.1.Общая постановка задачи. Разностно-дальномерный метод оценки местоположения источников радиоизлучения.....	82
3.2.Вычисление функции неопределенности в приложениях с жесткими ограничениями на длительность процессов оценки параметров сигналов.....	88
3.3.Модифицированная функция неопределенности	97
3.4.Результаты численного моделирования	98
3.5.Выводы.....	106
Заключение.....	108
Литература.....	109
Приложение. Обзор возможностей применения современных графических процессоров в задачах цифровой обработки сигналов на примере демодуляции частотно-манипулированных сигналов	117
Демодуляция ЧМн сигналов	117
Вычисления общего назначения на графических процессорах	120
Алгоритм прямого расчета свертки на графическом процессоре	123
Оценка производительности	126