

**ХМЕЛЕВ Сергей Леонидович**

**ПРИМЕНЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО ПОДХОДА  
МИНИМАЛЬНОЙ ДИСПЕРСИИ В ЗАДАЧЕ ОЦЕНКИ  
ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ С ФАЗОВОЙ И ЧАСТОТНОЙ  
МАНИПУЛЯЦИЕЙ**

01.04.03 – Радиофизика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Н.Новгород, 2010 г.

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

Научный руководитель: доктор технических наук,  
профессор Фидельман В.Р.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Орлов И.Я.

кандидат физико-математических наук,  
Вакс В.Л.

Ведущая организация: Самарский государственный аэрокосмический  
университет имени академика С.П. Королева

Защита состоится “29” июня 2010 г. В \_\_\_\_\_ часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.166.07 при Нижегородском государственном  
университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, Нижний Новгород,  
пр. Гагарина, 23, корп. 1, ауд. 420.

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

Автореферат разослан “\_\_\_” мая 2010 г.

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

Черепенников В.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

### Актуальность темы

Задача цифровой фильтрации встречается во многих областях науки и техники, в частности, связанных с решением задач обнаружения и оценки параметров сигналов. Общий подход к решению данных задач, формулируемых в терминах различения сигналов, основан на разделении этапов предварительной обработки и последующего принятия решения об обнаружении. Второй этап формулируется в виде проверки статистических гипотез и решается на основе классических подходов с использованием критериев, выбираемых исходя из специфики решаемой задачи. Проблема эффективной обработки сигналов в условиях параметрической неопределенности в присутствии помех различной природы возникает при решении большого числа практических задач. Основные теоретические подходы к их решению получены в фундаментальных работах Бакута П.А., Варакина Л.Е., Винера Н., Котельникова В.А., Лезина Ю.С., Левина Б.Р., Тихонова В.И., Сосулина Ю.Г. и многих других ученых. Вместе с тем, различия в свойствах обрабатываемых сигналов и характере помех, а также требования к вычислительной эффективности применяемых алгоритмов, обусловили большое число подходов, применяемых для решения задач цифровой обработки сигналов.

Таковыми задачами, в частности, являются задача демодуляции, играющая ключевую роль при создании систем связи, и задача определения временной задержки при многоканальном распространении, встречающаяся в различных областях науки и техники при оценке расстояния до источника излучения и исследовании дисперсионных свойств среды распространения. Использование различных видов кодирования и типов модуляции позволяет достигать компромисса между помехоустойчивостью канала связи и скоростью передачи данных. При этом существенные различия в параметрах сигналов, используемых в системах связи и навигации, приводят к невозможности построения универсальной схемы фильтрации. Классические подходы к решению данной задачи основаны на той или иной реализации подхода максимального правдоподобия.

Специфические свойства сигналов, используемых в современных многоканальных цифровых системах связи с временным разделением каналов, ограничивают возможность применения традиционных подходов и требуют разработки методов решения задач обработки таких сигналов, представляющих собой короткие информационные последовательности с фазовой или частотной манипуляцией, в присутствии аддитивных и фазовых шумов высокого уровня, а также относительного движения источника и приемника излучения. Согласованная фильтрация в подобных условиях теряет свою эффективность, а использование оптимальных алгоритмов, оценивающих характер и величину искажений, приводит к существенному росту вычислительных затрат, что

затрудняет их применение для обработки сигналов в режиме реального времени. Вместе с тем, существуют альтернативные алгоритмы цифровой фильтрации, которые не имеют описанных недостатков.

### **Цель диссертации**

Целью диссертационной работы является разработка и анализ эффективности алгоритмов оценки параметров сигналов с различными видами цифровой модуляции. Основой для разрабатываемых алгоритмов служат линейные и нелинейные схемы предварительной обработки, являющиеся модификациями подхода минимальной дисперсии Кейпона. Схемы применяются в задачах демодуляции и определения взаимной временной задержки при многоканальном распространении фазо- и частотно-манипулированных сигналов. Спецификой разрабатываемых алгоритмов является возможность вычислительно эффективной реализации на базе сигнальных процессоров или программируемых интегральных схем для работы в режиме реального времени по коротким сигналам в присутствии эффекта Доплера, а также аддитивных и фазовых шумов высокого уровня. Важной особенностью является возможность унифицированной реализации алгоритмов обработки сигналов с различными типами цифровой модуляции.

### **Научная новизна**

В диссертационной работе задача предварительной фильтрации сигналов с различными видами модуляции в условиях неточного знания центральной частоты и наличия шумовых помех неизвестного уровня решается на основе подхода минимальной дисперсии Кейпона. В частности, предложен алгоритм синтеза линейных информационно-оптимальных фильтров, основанных на обобщении подхода Кейпона. Применение данного алгоритма позволяет синтезировать субоптимальные фильтры, предназначенные для обработки сигналов, в спектре которых могут быть выделены одна и более частотных компонент. На основе применения данных фильтров разработаны алгоритмы демодуляции и определения взаимной временной задержки при многоканальном распространении частотно-манипулированных сигналов. В работе показана субоптимальность предложенного ранее подхода на основе использования квадратичного фильтра Кейпона при обработке ФМ-2 сигналов и проведено обобщение на случай ФМ-4 сигналов. Подход применен в задаче определения взаимной временной задержки при многоканальном распространении ФМ-4 сигналов, представляющих собой короткие битовые последовательности.

### **Практическая значимость работы**

Задача демодуляции в условиях неточного знания несущей частоты традиционно решается путем введения дополнительных адаптивных схем, структура которых существенно зависит от вида обрабатываемого сигнала, а

необходимость предварительной настройки ограничивает возможность их применения при обработке коротких битовых последовательностей. Классические алгоритмы определения взаимной временной задержки в условиях неточного знания несущей частоты сводятся к перебору по возможным значениям частотного сдвига. Многочисленные реализации подобного подхода основаны на построении и последующем анализе функции неопределенности. Вместе с тем, необходимость спектральной обработки больших объемов данных существенно затрудняет оценку временной задержки в режиме реального времени.

В диссертационной работе предложены алгоритмы определения взаимной временной задержки фазоманипулированных (ФМ-2 и ФМ-4) и частотно-манипулированных (ЧМн) сигналов, использующие предварительную цифровую обработку, целью которой является выделение информационной составляющей. Предлагаемые алгоритмы допускают унифицированную относительно типа сигнала эффективную реализацию на базе ПЛИС и сигнальных процессоров. Проведенные исследования устойчивости работы алгоритмов по отношению к аддитивным и фазовым шумам дают основания для их применения в задаче определения временной задержки сигналов с цифровой манипуляцией в условиях неточного знания несущей частоты в присутствии шумов высокого уровня. На основе предложенного алгоритма фильтрации ЧМн сигналов также решена задача демодуляции.

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

- модификация подхода минимальной дисперсии Кейпона для определения коэффициентов линейного фильтра, настроенного на пропускание произвольного числа частотных компонент, и реализация алгоритма синтеза таких фильтров на основе оптимизации информационного функционала;
- цифровой алгоритм предварительной обработки частотно-манипулированных сигналов на основе использования линейного фильтра, настроенного на пропускание двух частотных компонент и его применение в задачах определения взаимной временной задержки при многоканальном распространении и демодуляции;
- метод нелинейной цифровой фильтрации фазоманипулированных (ФМ-2 и ФМ-4) сигналов, его применение и программная реализация в задаче определения взаимной временной задержки;
- результаты моделирования и исследования устойчивости работы алгоритмов определения взаимной временной задержки ЧМн и ФМ-4 сигналов при многоканальном распространении, а также демодуляции ЧМн сигналов в условиях воздействия аддитивных и фазовых шумов высокого уровня и неточного знания несущей частоты.

## **Апробация результатов и публикации**

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались:

- на X, XI, XII международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение», Москва, 2008, 2009, 2010 гг.;
- на одиннадцатой научной конференции по радиофизике, посвященной 105-й годовщине со дня рождения М.Т. Греховой, Н.Новгород, РФ ННГУ, 2007 г.;
- на международной научно-технической конференции «IEEE EUROCON-2009», Санкт-Петербург, 2009 г.;
- на международной научно-технической конференции «The 3rd International Symposium on Communications, Control and Signal Processing», St. Julians, Malta, 2008 г.;
- на международной научно-технической конференции «Digital Signal Processing Workshop and 5th IEEE Signal Processing Education Workshop», USA, Florida, Macro Island, 2009 г.;
- на всероссийской научно-технической конференции Информационные системы и технологии, Н.Новгород, НГТУ, 2008 г.;

и были опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК:

- в журнале «Автоматрия», 2008;
- в журнале «Известия ВУЗов. Радиофизика», 2008, 2009;
- в журнале «Вестник ННГУ», 2008.

## **Личный вклад автора**

Автору принадлежит алгоритм синтеза линейных фильтров, настроенных на пропускание произвольного числа частотных компонент, применение данных фильтров в задачах оценки параметров ЧМн сигналов, метод фильтрации ФМ-4 сигналов и его применение в задаче определения взаимной временной задержки при многоканальном распространении. Выбор направления исследований, постановка задач и обсуждение полученных результатов проводилось совместно с научным руководителем – заведующим кафедрой ИТФИ Фидельманом В.Р., доцентами кафедры ИТФИ Морозовым О.А., Солдатовым Е.А., а также старшим преподавателем Логиновым А.А. Аналитические расчеты и численное моделирование предложенных алгоритмов выполнены лично автором.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и трех приложений. Общий объем диссертации составляет 108 страниц, включая 36 рисунков и список литературы из 105 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обосновывается актуальность работы, формулируются ее цели, кратко излагается содержание диссертации, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена обзору актуальных в настоящее время задач обнаружения и оценки параметров сигналов и подходов, которые используются для их решения. Основное внимание уделено оптимальным подходам (п. 1.1), основанным на принципе максимального правдоподобия и реализующим их алгоритмам, которые могут быть применены для решения задач определения взаимной временной задержки при многоканальном распространении (п. 1.2) и демодуляции (п. 1.3) в присутствии эффекта Доплера. Приводится краткое описание преимуществ и недостатков традиционных методов решения поставленных задач и ограничения на область применения. Рассмотрены оптимальные подходы к синтезу линейных фильтров (п. 1.4) и возможные пути их модификации с целью решения поставленных в работе задач. Приводится обоснование возможности использования принципа информационной оптимальности в рамках построения субоптимальных алгоритмов обработки сигналов (п. 1.5). В заключении главы (п. 1.6) формулируются основные направления проведенного в данной работе исследования.

**Вторая глава** посвящена разработке алгоритма определения коэффициентов линейных фильтров, основанного на модификации подхода минимальной дисперсии Кейпона.

П. 2.1-2.2 посвящены постановке задачи модификации подхода Кейпона с целью синтеза линейного фильтра, настроенного на пропускание нескольких частотных компонент, на основе оптимизации информационного функционала:

$$\begin{cases} \sum_{k=0}^{N-1} c_k \exp(2\pi f_j ik) = b_j, & j = 1 \dots N_b, \\ H(\{f\}_m) \leq B_m, & m = 1 \dots N_B, \\ \Phi \rightarrow opt, \\ \mathbf{c}^H \mathbf{R}_{xx} \mathbf{c} \rightarrow \min, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\mathbf{c}$  – вектор коэффициентов фильтра длины  $N$ ,  $b_j$  – требуемый коэффициент пропускания на частоте  $f_j$ ,  $N_b$  – число интересующих частотных компонент,  $\{f\}_m$  –  $m$ -ый частотный диапазон,  $B_m$  – ограничение на амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) фильтра,  $N_B$  – число ограничений в виде неравенств,  $H(f)$  – частотная характеристика фильтра,  $\Phi$  – оптимизируемый функционал,  $\mathbf{R}_{xx}$  – автокорреляционная матрица сигнала, содержащего интересующие нас частоты.

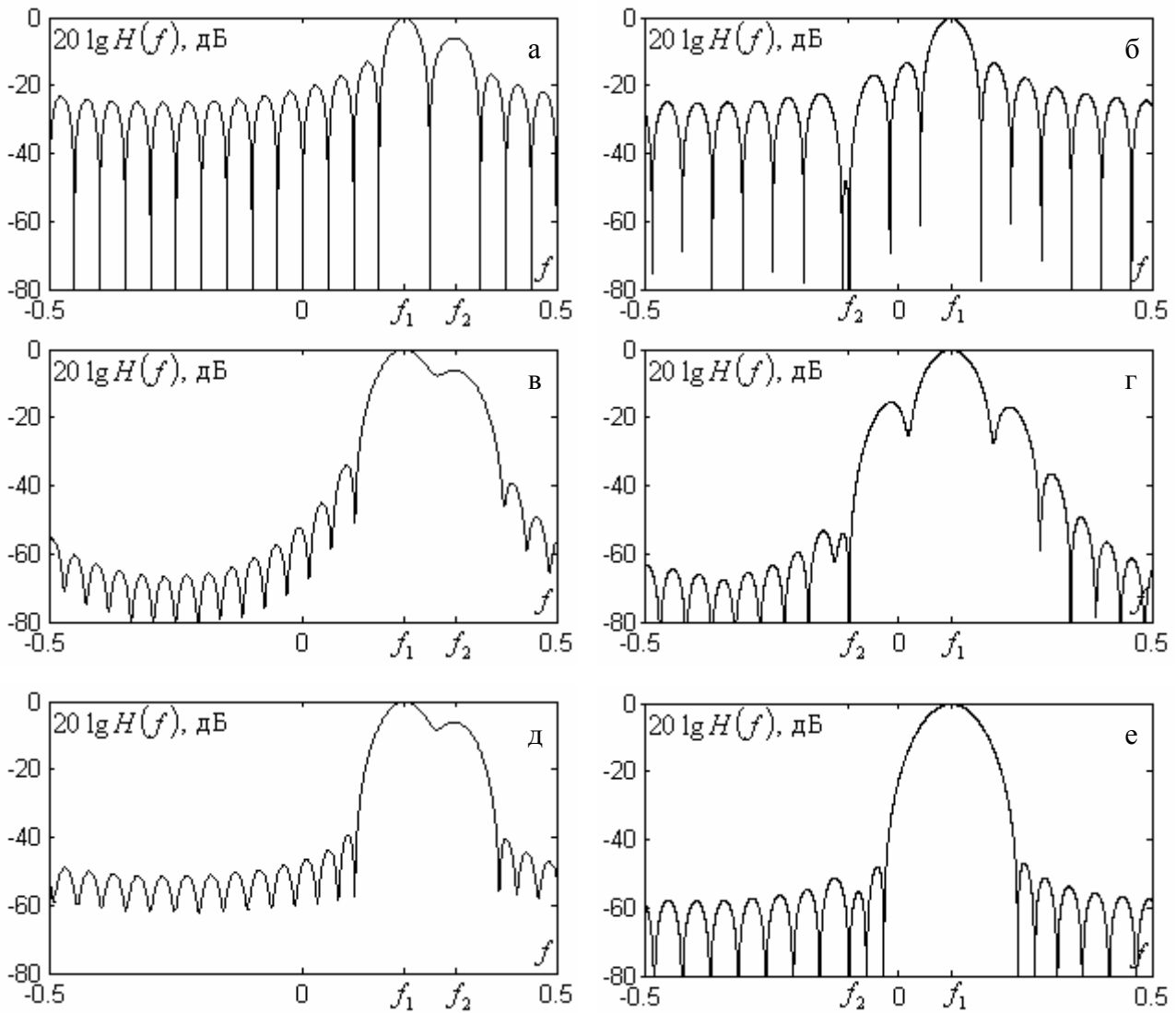


Рис. 1 Амплитудно-частотные характеристики фильтров.

В п. 2.2. рассматриваются критерии оптимальности, которые могут быть использованы при решении задачи (1): функционал минимальной нормы (рис. 1 (а, б)), функционал энтропии Реньи (рис. 1 (в, г)) и функционал энтропии Берга (рис. 1 (д, е)). На рис. 1 приведен вид АЧХ фильтров с параметрами  $N=20$ ,  $f_1=0.2$ ,  $f_2=0.3$ ,  $b_1=1$ ,  $b_2=0.5$  (а, в, г) и  $N=17$ ,  $f_1=0.1$ ,  $f_2=-0.1$ ,  $b_1=1$ ,  $b_2=0$ . Частоты заданы в долях частоты дискретизации.

П. 2.3 посвящен анализу свойств фильтров, получаемых на основе решения системы (1). Производится сравнение амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик фильтров, синтезированных с использованием различных критериев, а также на основе традиционного чебышевского подхода. На основе сравнения делаются выводы о преимуществах и недостатках предложенного подхода синтеза фильтров при использовании различных функционалов.

В п. 2.4 обосновывается невозможность получения аналитического решения системы (1) в общем случае и описывается численный алгоритм



получения коэффициентов фильтра на основе методов многомерной оптимизации. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 2.

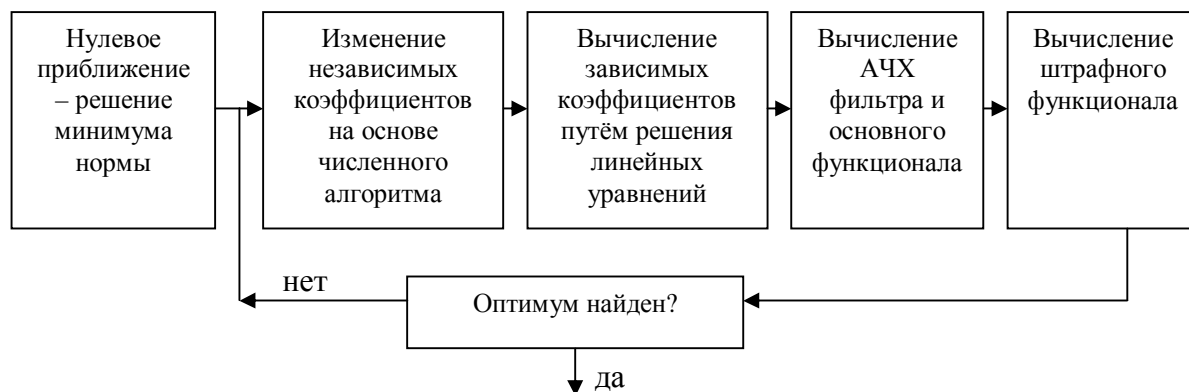


Рис. 2. Схема численного алгоритма оптимизации системы (1).

В п. 2.5 проводится сравнение использования различных функционалов при синтезе фильтров (1) в рамках задачи демодуляции частотно-манипулированных сигналов на основе полосовых фильтров. Сравнение производится с точки зрения устойчивости к уровню аддитивного шума, а также к величине неизвестного частотного сдвига.

В п. 2.6 сделаны выводы по второй главе.

**Третья глава** посвящена задаче предварительной обработки частотно-манипулированных (ЧМн) сигналов на основе фильтров, настроенных на пропускание двух частотных компонент.

В п. 3.1 описывается подход фильтрации фазоманипулированных (ФМн) сигналов на основе вычисления функции текущей дисперсии

$$s[n] = \mathbf{c}^H \mathbf{R}_n \mathbf{c}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{R}_n$  – автокорреляционная матрица (АКМ) обрабатываемого сигнала, вычисленная по ограниченной выборке в окрестности входного отсчета  $n$ ,  $\mathbf{c}$  – вектор коэффициентов линейного фильтра Кейпона, настроенного на пропускание несущей частоты сигнала. Обосновывается необходимость обобщения данного подхода для случая ЧМн сигналов. В п. 3.2 приводится обобщение подхода на основе вычисления функции (2) для случая ЧМн сигналов, основанное на построении фильтров Кейпона, настроенных на пропускание двух частотных компонент. Показана связь между полученным аналитическим решением задачи синтеза фильтров и классическим фильтром минимальной дисперсии. Показана эффективность применения предложенного во второй главе алгоритма поиска коэффициентов с использованием различных критериев оптимальности в рамках решения поставленной задачи.

П. 3.3. посвящен применению алгоритма предварительной обработки ЧМн сигналов на основе вычисления функции текущей дисперсии в задаче определения взаимной временной задержки при многоканальном распространении в присутствии эффекта Доплера. Приводится методика численного моделирования решения задачи определения взаимной временной

задержки при многоканальном распространении и погрешность данного метода. Зависимость вероятности правильного определения задержки  $P$  от отношения сигнал/шум приведена на рис. 3. для сигналов, представляющих собой информационные последовательности длиной 20 бит (линия 1), 30 бит (линия 2), 40 бит (линия 3), 50 бит (линия 4) и 60 бит (линия 5).

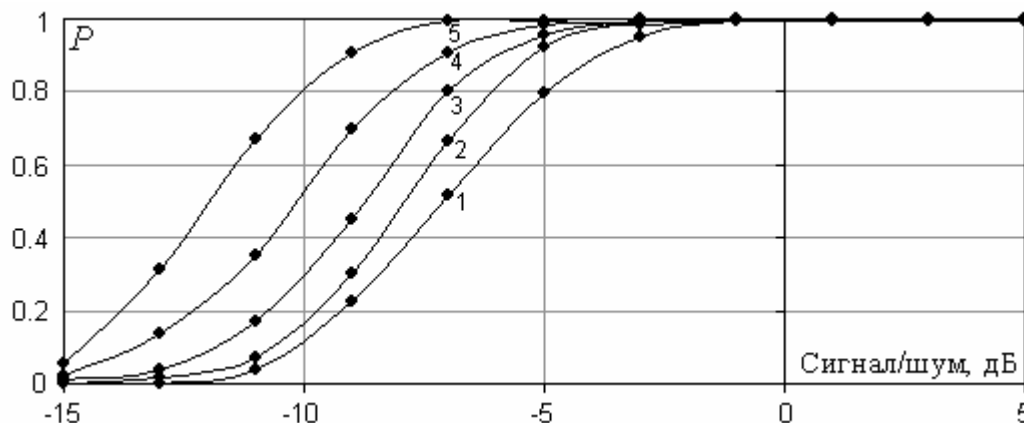


Рис. 3. Вероятность правильного определения задержки от отношения сигнал/шум для информационных последовательностей длиной 20 (линия 1), 30 (линия 2), 40 (линия 3), 50 (линия 4) и 60 (линия 5) бит.

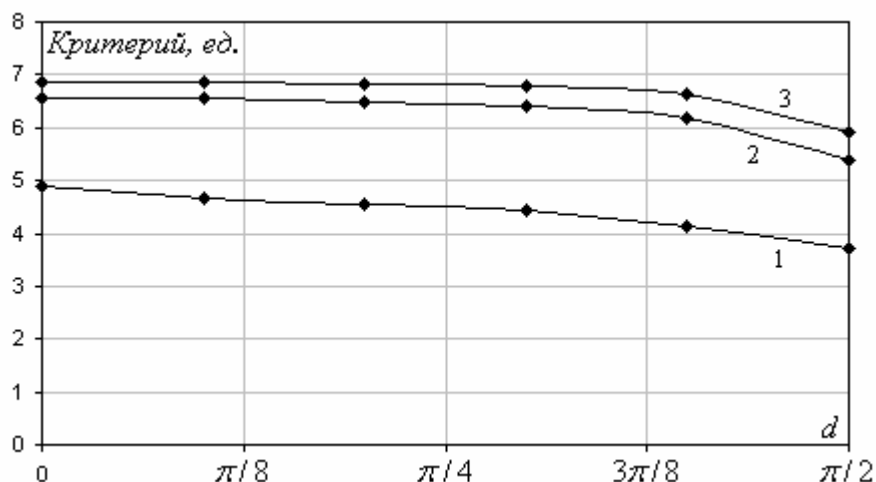


Рис. 4. Зависимость критерия эффективности решения обнаружения от уровня фазового шума для информационных последовательностей 20 бит (линия 1), 40 бит (линия 2) и 60 бит (линия 3).

Анализ данных зависимостей позволяет сделать вывод о том, что алгоритм устойчиво работает (вероятность правильного обнаружения при этом близка к 1) до соотношения 0 дБ при длине последовательности 20 бит. Увеличение длины выборки до 60 бит позволяет повысить помехоустойчивость алгоритма на 5 дБ.

На рис. 4 приведена зависимость безразмерного критерия эффективности решения обнаружения от уровня фазовых шумов, которые полагаются равномерно распределенными в заданном диапазоне  $d$  для сигналов длиной 20

бит (линия 1), 40 бит (линия 2) и 60 бит (линия 3). Анализ поведения полученных зависимостей позволяет сделать вывод: при плавном увеличении уровня фазового шума не происходит резкого падения эффективности, что говорит об устойчивости решения задачи определения временной задержки предлагаемым методом к соответствующим искажениям.

В п. 3.4 решается задача демодуляции ЧМн сигналов на основе линейной фильтрации с помощью фильтров, построенных на основе системы (1). На рис. 5 приведены результаты моделирования предложенного метода демодуляции (линии 1, 2, 3) в сравнении с традиционной схемой на основе полосовых фильтров (линии 4, 5, 6) для различных доплеровских сдвигов. Анализ полученных зависимостей позволяет сделать следующие выводы. Использование выхода фильтра (1) в качестве основы позволяет построить алгоритм демодуляции ЧМн сигналов, устойчивый в некотором диапазоне к воздействию эффекта Доплера. Для рассматриваемых в ходе моделирования сигналов предложенный алгоритм обеспечивает вероятность ошибки не более  $10^{-3}$  для соотношения сигнал/шум не хуже +6 дБ, проигрывая традиционной схеме около 1.5 дБ. Вместе с тем, предложенный алгоритм требует использования только одного линейного фильтра.

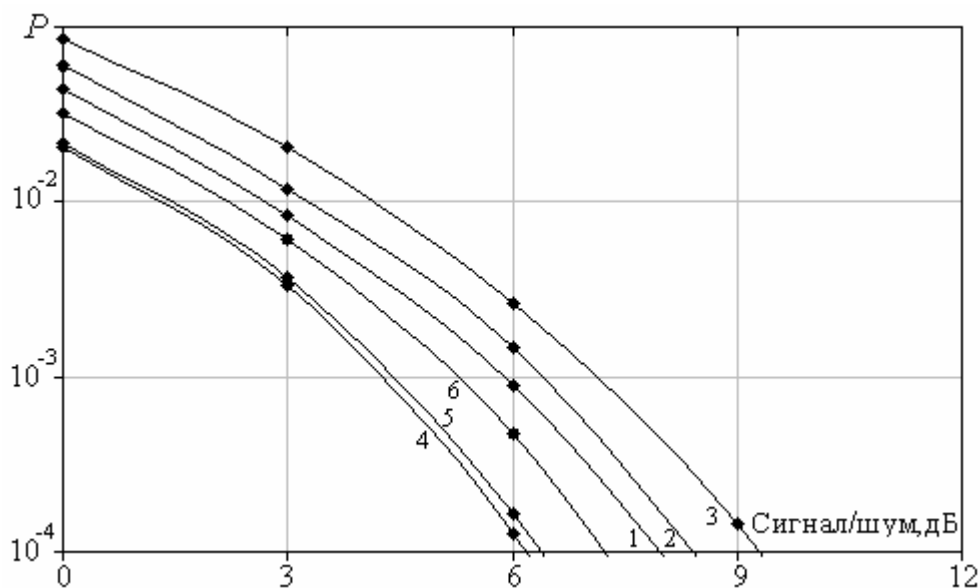


Рис. 5. Зависимость вероятности символьной ошибки от отношения сигнал/шум и частотного сдвига на 0 кГц (линии 1, 4), 1 кГц (линии 2, 5) и 2 кГц (линии 3, 6).

В п. 3.5 сделаны выводы по третьей главе.

**Четвертая глава** посвящена разработке и исследованию эффективности алгоритма предварительной обработки фазоманипулированных сигналов на основе нелинейного подхода минимальной дисперсии.

В п. 4.1 описывается квадратичный фильтр минимальной дисперсии, основанный на модификации линейного фильтра минимальной дисперсии.

В п. 4.2 приведено исследование свойств модуля спектра отрезка гармонического сигнала частоты  $f_0$ , длины  $T$ , содержащего манипуляцию на  $u$  радиан:

$$S(f) = \left| \frac{\sin(2p(f - f_0)T/4)}{2p(f - f_0)/4} \cdot \cos\left(\frac{2p(f - f_0)T/2 - u}{2}\right) \right|. \quad (3)$$

На рис. 6 (а) приведены кривые, соответствующие  $S(f)$  для  $u = 0, p, \pm p/2$ . При  $\{u = 0, f = f_0\}$  значение функции (3) максимально (рис. 6 (а) – линия 1), а при  $\{u = p, f = f_0\}$  равно нулю (рис. 6 (а) – линия 2). Таким образом, выход фильтрующей системы, настроенной на частоту  $f_0$ , является максимальным при обработке немодулированной синусоиды и минимальным при обработке участка сигнала с фазовой манипуляцией на  $p$  радиан.

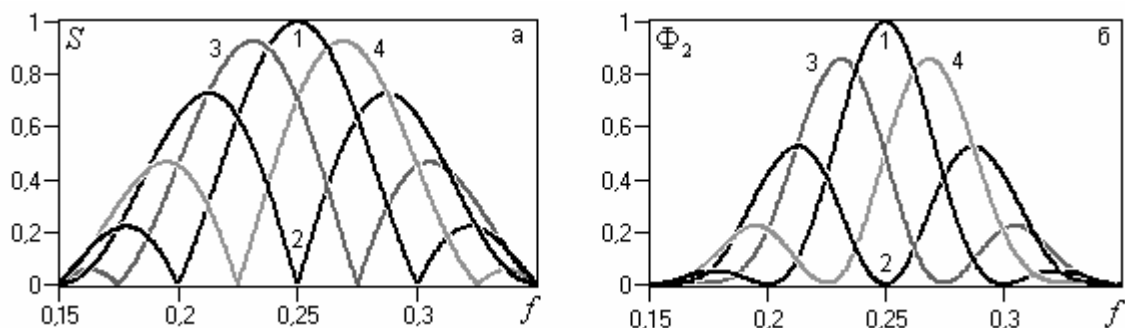


Рис. 6. Модуль спектра  $S(f)$  (а) и зависимость  $\Phi_2(f)$  отклика квадратичного фильтра (б) для  $f_0 = 0.25$ ,  $T = 20$ ,  $u = 0$  (линия 1),  $u = p$  (линия 2),  $u = -p/2$  (линия 3),  $u = p/2$  (линия 4).

Вместе с тем, для значений  $u = \pm p/2$  (что соответствует случаю ФМ-4 сигнала) происходит смещение спектра сигнала (3) относительно несущей частоты (рис. 6 (а) – линии 3, 4), направление смещения определяется знаком  $u$ . Отклик фильтра, настроенного на  $f_0$ , для сигнала с  $u = \pm p/2$  не только не является максимальным, но и оказывается независимым от знака  $u$ ; кроме того, отклик достаточно сильно чувствителен к частотному сдвигу. Данные ограничения приводят к необходимости обобщения предложенного ранее подхода обработки путем введения дополнительных узкополосных фильтров, настроенных на соответствующие характерные частоты  $f_0^\pm$  спектра сигнала (3) с  $u = \pm p/2$ . Выбор частот  $f_0^\pm$  производится на основе критерия максимизации величины отклика на соответствующие фазовые манипуляции, а их положение определяется видом модуля спектра  $S(f)$  и свойствами используемой фильтрующей системы. На рис. 6 (б) приведена зависимость отклика квадратичного фильтра минимальной дисперсии от частоты, на которую он настроен, при обработке отрезка гармонического сигнала с фазовой

манипуляцией на  $u$  радиан. Из рисунка видно, что характер зависимости совпадает с модулем спектра сигнала (3).

На основании проведенного исследования предложено обобщение предложенной ранее схемы обработки ФМ-2 сигналов, основанное на введении двух дополнительных квадратичных фильтров, настроенных на соответствующие частоты.

П. 4.3 посвящен применению предложенной схемы фильтрации ФМ-4 сигналов в задаче определения взаимной временной задержки при многоканальном распространении в присутствии эффекта Доплера. Зависимость вероятности правильного определения задержки  $P$  от отношения сигнал/шум приведена на рис. 7. для схемы с одним фильтром (линия 1), предложенного обобщения (линия 2) и схемы на основе вычисления тела неопределенности (линия 3). Алгоритм устойчиво работает для соотношения сигнал/шум не менее -3 дБ, что на 6 дБ лучше, чем при использовании одного фильтра, настроенного на несущую частоту. Проигрыш в 3 дБ относительно классической схемы на основе тела неопределенности компенсируется существенным выигрышем с точки зрения вычислительной эффективности.

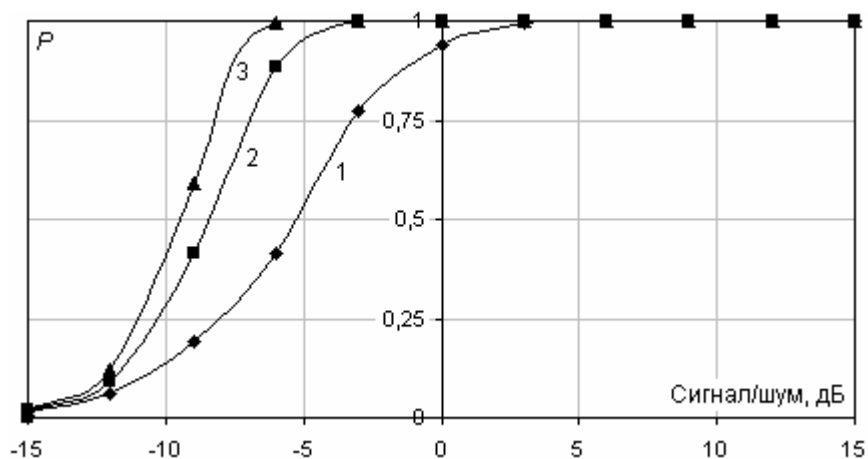


Рис. 7. Результаты моделирования для схемы с одним фильтром (линия 1), для предложенной схемы из трех фильтров (линия 2) и для алгоритма на основе построения функции неопределенности (линия 3).

На рис. 8 приведена зависимость безразмерного критерия эффективности решения обнаружения от уровня фазовых шумов, которые полагаются равномерно распределенными в заданном диапазоне  $d$  для сигналов длиной 60 бит. Анализ поведения полученной зависимости позволяет сделать вывод: при плавном увеличении уровня фазового шума не происходит резкого падения эффективности, что говорит об устойчивости решения задачи определения временной задержки предлагаемым методом к соответствующим искажениям.

В п. 4.4 сделаны выводы по четвертой главе.

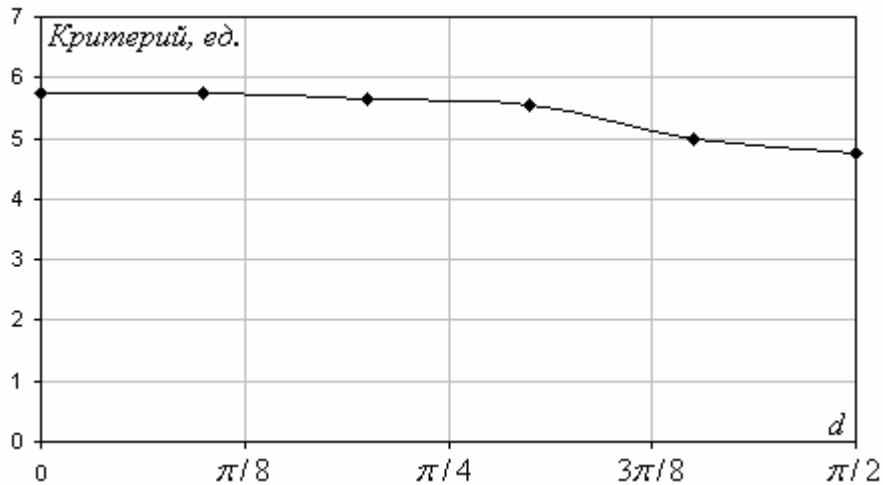


Рис. 8. Зависимость критерия эффективности решения обнаружения от уровня фазового шума  $d$ .

В **заключении** содержится сводка основных результатов.

В **приложении 1** показана эквивалентность критерия минимальной нормы вектора коэффициентов и требования максимального в статистическом смысле подавления белого шума при синтезе фильтров.

В **приложении 2** приведены предельные параметры частотно-манипулированных сигналов, для которых возможно построение фильтров, предложенных во второй главе.

В **приложении 3** описан метод многомерной оптимизации Хука-Дживса, используемый в рамках алгоритма синтеза линейных информационно-оптимальных фильтров.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты, полученные в диссертационной работе, состоят в следующем:

- Разработан численный алгоритм, основанный на оптимизации информационного функционала для определения коэффициентов линейных фильтров, настроенных на пропускание произвольного числа частотных компонент, являющийся модификацией подхода минимальной дисперсии Кейпона;
- проведены исследования эффективности использования различных функционалов при синтезе фильтров для решения задачи демодуляции частотно-манипулированных (ЧМн) сигналов на основе полосовых фильтров;
- разработан алгоритм предварительной обработки ЧМн сигналов на основе линейного фильтра, настроенного на пропускание двух частотных компонент; алгоритм применен в задачах демодуляции и определения взаимной временной задержки при многоканальном распространении;
- проведено моделирование и исследование устойчивости работы алгоритмов определения взаимной временной задержки при многоканальном распространении и демодуляции ЧМн сигналов относительно уровня аддитивных и фазовых шумов в присутствии эффекта Доплера;
- разработан алгоритм нелинейной цифровой фильтрации фазоманипулированных (ФМ-2 и ФМ-4) сигналов на основе субоптимальной обработки нестационарных участков сигнала; алгоритм применен в задаче определения взаимной временной задержки при многоканальном распространении ФМ-4 сигналов;
- проведено моделирование и исследование устойчивости работы алгоритма определения взаимной временной задержки при многоканальном распространении ФМ-4 сигналов относительно уровня аддитивных и фазовых шумов в присутствии эффекта Доплера.

Результаты проведенных в работе исследований позволяют делать выводы о возможности применения предложенных алгоритмов для решения практических задач. Спецификой разработанных алгоритмов является возможность эффективной реализации на базе сигнальных процессоров или программируемых интегральных схем для работы в режиме реального времени по коротким сигналам в присутствии эффекта Доплера. Важной особенностью является возможность унифицированной реализации алгоритмов обработки сигналов с различными типами цифровой модуляции.

## СПИСОК РАБОТ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Логинов А.А., Морозов О.А., Солдатов Е.А., Хмелев С.Л. Применение цифровой фильтрации на основе модифицированного подхода Кейпона в задаче демодуляции ЧМ сигналов // Автометрия. 2008. Т. 44, № 3. С. 57-64.
2. Логинов А.А., Морозов О.А., Солдатов Е.А., Хмелев С.Л. Метод определения временной задержки ЧМ сигналов на основе модифицированного подхода минимума дисперсии Кейпона // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2008. Т. LI, № 7. С. 633-640.
3. Логинов А.А., Морозов О.А., Семенова М.Ю., Хмелев С.Л. Синтез субоптимальных цифровых фильтров на основе обобщения подхода Кейпона // Вестник ННГУ. 2008. № 2. С. 39-45.
4. Логинов А.А., Морозов О.А., Хмелев С.Л. Алгоритм цифровой предварительной обработки ФМ-4 сигналов в задаче определения взаимной временной задержки // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2009. №5-6. С. 122-129.
5. Логинов А.А., Морозов О.А., Солдатов Е.А., Хмелев С.Л. Применение модифицированного подхода Кейпона в задаче демодуляции ЧМ сигналов // Труды Одиннадцатой Научной конференции по радиофизике, посвященной 105-й годовщине со дня рождения М.Т. Греховой (Н.Новгород, 2007). С. 144-145.
6. Логинов А.А., Морозов О.А., Солдатов Е.А., Хмелев С.Л. Применение модифицированного подхода минимальной дисперсии в задачах оценки параметров частотно-манипулированных сигналов // Сборник трудов Десятой международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (Москва, 2008). Т.1. С. 61-64.
7. Логинов А.А., Морозов О.А., Хмелев С.Л. Метод субоптимальной нелинейной фильтрации в задаче предварительной обработки ФМ-4 сигналов // Сборник трудов Одиннадцатой международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (Москва, 2009). С. 365-369.
8. Хмелев С.Л. Цифровая схема автоподстройки частоты в задаче приема частотно-манипулированных сигналов // Сборник трудов Двенадцатой международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (Москва, 2010). Т.2. С. 33-38.
9. Khmelev S.L., Loginov A.A., Morozov O.A. The modified Capon approach in the task of binary FSK-signals demodulation // IEEE EUROCON 2009, 2009. pp. 1370-1373.
10. Логинов А.А., Хмелев С.Л. Квазиоптимальный алгоритм обработки ФМ4 сигналов в задаче оценки взаимной временной задержки // Тезисы Всероссийской научно-технической конференции Информационные системы и технологии ИСТ-2008 (Н.Новгород, 2008). С. 9-11.



11. Khmelev S.L., Loginov A.A., Morozov O.A., Semenova M.Y. Applying Modified Capon Approach to the Problem of Phase-Shift Keyed Signal Demodulation // 11th Australian Communications Theory Workshop. Booklet of abstracts. The Australian National University. 2010. p. 21.
12. Khmelev S.L., Loginov A.A., Morozov O.A., Soldatov E.A. The Algorithm for Processing Phase-shift Keyed Signals in the Problem of Time Delay Estimation // Third International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (Malta, 2008). pp. 344-347.
13. Khmelev S.L., Loginov A.A., Morozov O.A. Adaptive Algorithm for Phase-Shift Keyed Signal Processing by Information-Optimal Filter in the Problem of Time Delay Estimation // Digital Signal Processing Workshop and 5th IEEE Signal Processing Education Workshop, Marco Island, FL, 2009, pp. 113-114.

## ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Введение

#### Глава 1. Методы оптимального обнаружения и оценки параметров сигналов (обзор литературы)

- 1.1. Современные методы оптимального обнаружения
- 1.2. Оптимальные алгоритмы определения временной задержки
- 1.3. Оптимальная обработка сигналов с цифровой модуляцией
- 1.4. Принципы синтеза линейных фильтров
- 1.5. Информационно-оптимальный подход к решению недоопределенных задач
- 1.6. Заключение

#### Глава 2. Алгоритм синтеза линейных фильтров для обработки сигналов с выделенными частотными компонентами на основе подхода минимальной дисперсии

- 2.1. Постановка задачи
- 2.2. Синтез фильтров на основе обобщения подхода Кейпона
- 2.3. Анализ частотных характеристик
- 2.4. Решение задачи синтеза фильтров
- 2.5. Сравнение использования различных функционалов при синтезе фильтров для решения задачи демодуляции
- 2.6. Выводы

#### Глава 3. Применение линейных фильтров минимальной дисперсии в задаче оценки параметров частотно-манипулированных сигналов

- 3.1. Предварительная обработка сигналов на основе вычисления функции текущей дисперсии
- 3.2. Синтез фильтра минимальной дисперсии для обработки частотно-манипулированных сигналов
- 3.3. Применение обобщенного фильтра минимальной дисперсии в задаче определения взаимной временной задержки частотно-манипулированных сигналов
- 3.4. Применение обобщенного фильтра минимальной дисперсии в задаче демодуляции частотно-манипулированных сигналов
- 3.5. Выводы

#### Глава 4. Применение нелинейных фильтров минимальной дисперсии в задаче оценки параметров ФМ-4 сигналов

- 4.1. Нелинейный фильтр минимальной дисперсии
- 4.2. Построение алгоритма обработки ФМ-4 сигналов
- 4.3. Применение нелинейных фильтров минимальной дисперсии в задаче определения взаимной временной задержки ФМ-4 сигналов
- 4.4. Выводы

### Заключение

### Литература

### Приложения