

**БОЛДЕНКОВ ЕВГЕНИЙ НИКОЛАЕВИЧ**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ  
АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В АППАРАТУРЕ  
СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ**

Специальность 05.12.14 — Радиолокация и радионавигация

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре радиотехнических систем Московского Энергетического института (ТУ).

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Перов Александр Иванович**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
**Власов Игорь Борисович**

кандидат технических наук, доцент  
**Поваляев Александр Александрович**

**Ведущая организация:** ФГУП “Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения”, г. Москва

Защита состоится “24” мая 2007 г. в 15 ч. 30 мин. на заседании Диссертационного совета Д 212.157.05 при Московском Энергетическом институте (ТУ) по адресу: 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., 17, аудитория А-402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МЭИ (ТУ).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: **111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 14, Учёный совет МЭИ (ТУ).**

Автореферат разослан “\_\_\_” апреля 2007.

Учёный секретарь Диссертационного совета Д 212.157.05  
кандидат технических наук, доцент

Т. И. Курочкина

### Актуальность темы

В настоящее время происходит быстрое развитие систем спутниковой навигации (СРНС), сопровождающееся расширением круга задач, решаемых с их помощью. Вместе с ростом областей применения СРНС повышаются требования к характеристикам аппаратуры спутниковой навигации, среди которых высокая точность навигационного решения, функционирование в сложной помеховой обстановке, приём слабых сигналов в условиях затенения.

Приёмная аппаратура совершенствуется, что приводит к постоянному повышению её характеристик, однако не все проблемы могут быть разрешены в аппаратуре потребителя. Такие показатели, как доступность измерений и точность эфемеридной информации зависят от космического сегмента СРНС и наземной службы её поддержки, поэтому требуется совершенствовать саму систему.

В настоящее время идёт активная работа по модернизации СРНС ГЛО-НАСС по ряду направлений:

1. модернизация космического сегмента системы:

- а. введение новых частотных диапазонов излучения сигналов;
- б. введение новых и модернизация существующих сигналов;
- в. введение дополнительной автономной системы межспутниковых измерений;
- г. передача в системе ГЛОНАСС дополнительных телеметрических сигналов;

2. модернизация наземного сегмента системы:

- а. создание новых станций приёма спутниковых сигналов и контроля целостности;
- б. создание станций для обеспечения ввода в эксплуатацию и контроля состояния системы межспутниковых измерений;
- в. разработка технических решений по приёму совместно передаваемых навигационных и дополнительных телеметрических сигналов.

В диссертации рассматриваются вопросы, связанные с пунктами 1 в, 1 г, 2 в.

В рамках модернизации в новом поколении спутников ГЛОНАСС М в 2007 году планируется введение в систему бортовой аппаратуры межспутниковых измерений (БАМИ). Данная система должна осуществлять измерения псевдодальностей и взаимных скоростей движения навигационных спутников

(НС). Данная информация затем будет использована бортовым вычислительным комплексом для внесения поправок в эфемеридную информацию НС. Система БАМИ имеет ряд особенностей:

- очень высокие требования по точности (3 мм/с по скорости и 0.3 м по псевдодальности);
- малая длительность интервала измерений;
- необходимость формирования оценок на момент времени, лежащий внутри интервала измерений;
- малое время поиска сигнала.

Задача повышения точности оценки параметров сигнала решается с использованием теории оптимальной фильтрации, которая применена в работе. В диссертационной работе рассматриваются вопросы синтеза оптимальных комплексных систем фильтрации фазы и задержки сигнала в аппаратуре межспутниковых измерений, а также синтез оптимального алгоритма интерполяции измерений на требуемый момент времени. Кроме того, предложена структура блока быстрого поиска сигнала системы БАМИ.

Вторым направлением совершенствования СРНС ГЛОНАСС является введение дополнительного канала передачи телеметрической информации. Учитывая высокую стоимость вывода на орбиту НС, а также ограниченность частотного ресурса, рассматривается возможность передачи телеметрических данных совместно с одним из навигационных сигналов путём создания составного сигнала. В работе рассматривается синтез алгоритма оптимального приёма сигнала с комбинированной модуляцией и алгоритм декодирования навигационного и телеметрического сообщений.

Приём сигнала с комбинированной модуляцией будет осуществляться на специальных пунктах в окружении других радиотехнических средств, многие из которых создают узкополосные помехи в полосе навигационного сигнала. Появляется задача обеспечения помехозащиты приёмника. В работе рассматривается синтез алгоритма подавления нескольких узкополосных помех в форме трансверсального фильтра.

### **Цели и задачи работы**

**Целью** диссертационной работы является повышение эффективности работы СРНС ГЛОНАСС путём оптимизации алгоритмов обработки в бортовой аппаратуре межспутниковых измерений и приёма совмещённого навигационного

и телеметрического сигнала, в том числе в условиях воздействия узкополосных помех.

В соответствии с целью работы были поставлены следующие **задачи**:

1. синтез алгоритмов слежения за параметрами сигнала для БАМИ, обеспечивающие заданные требования по точности;
2. разработка алгоритма быстрого поиска сигнала системы межспутниковых измерений;
3. синтез оптимального алгоритма обработки сигнала с комбинированным законом модуляции навигационным и телеметрическим сообщениями;
4. синтез алгоритма работы системы подавления нескольких узкополосных помех в форме трансверсального фильтра;
5. разработка алгоритма вычисления коэффициентов трансверсального фильтра системы подавления узкополосных помех;
6. разработка математических моделей для синтезированных в (п. 1 - 5) алгоритмов, проведение математического моделирования с оценкой характеристик точности, вероятностных характеристик.

**Методы исследования** При решении поставленных задач использованы методы теории вероятностей и математической статистики, статистической теории радиотехнических систем, теории оптимальной фильтрации случайных процессов, статистического моделирования, вычислительной математики и программирования.

**Научная новизна** В диссертационной работе получены следующие новые результаты, выносимые на защиту:

- оптимальный алгоритм оценки псевдодальности и скорости для фиксированного момента времени по всему доступному интервалу измерений, включающий алгоритмы оценки фазы и псевдодальности, а также комплексный алгоритм интерполяции измерений;
- алгоритм быстрого поиска сигнала системы межспутниковых измерений на основе дискретной свёртки в спектральной области, отличающийся от известных меньшими вычислительными затратами;
- синтез алгоритмов приёма сигнала с комбинированным законом модуляции навигационным и телеметрическим сообщениями; анализ характеристик синтезированного алгоритма;
- синтез адаптивного алгоритма обработки наблюдений при воздействии

нескольких узкополосных помех в форме трансверсального фильтра;

- алгоритм быстрого вычисления коэффициентов трансверсального фильтра для системы подавления узкополосных помех в виде комбинации алгоритма формирования коэффициентов и градиентного метода решения системы линейных уравнений;
- результаты имитационного моделирования рассматриваемых алгоритмов.

### **Практическая ценность работы**

1. материал диссертации использован при разработке аппаратуры межспутниковых измерений, что позволило обеспечить требуемые характеристики точности;
2. предложенный алгоритм быстрого поиска сигнала БАМИ, позволяет реализовать процедуру поиска сигнала БАМИ при отсутствии эфемеридных данных;
3. синтезированный алгоритм обработки комбинированного сигнала использован при выполнении НИР по передаче сигналов БСК-Р через аппаратуру спутника ГЛОНАСС;
4. предложенный метод вычисления коэффициентов трансверсального фильтра использован в макете блока подавления узкополосных помех, что позволило существенно снизить требования к вычислительным ресурсам и памяти;

**Реализация и внедрение результатов исследования** Результаты исследований и разработанное программное обеспечение использованы при выполнении НИР и ОКР:

1. Исследование и моделирование перспективных алгоритмов обработки сигналов для аппаратуры КПА БАМИ: Научно-технический отчёт по составной части ОКР “БАМИ” / МЭИ (ТУ). — М., 2004. — гл. 1-3, с. 7-45.
2. Исследование влияния структуры и параметров сигнального пакета на вероятность обнаружения и точность измерений псевдодальности для опытного образца БАМИ: Научно-технический отчёт по составной части ОКР “БАМИ” / МЭИ (ТУ). — М., 2005. — гл. 2-3, с. 27-51.
3. Исследование и моделирование технических решений по передаче сигналов БСК-Р КА “ГЛОНАСС” с помощью аппаратуры БИНС и обеспечению совместимости БСК-Р и БИНС: Отчёт по НИР / МЭИ (ТУ). — М., 2005.
4. Разработка помехоустойчивой навигационной аппаратуры потребителя гло-

бальных навигационных систем: Эскизный проект по ОКР / МЭИ (ТУ). — М., 2006.

Внедрение результатов исследования подтверждается актами, полученными в МЭИ (ТУ), ФГУП “РНИИ КП”, ФГУП “НИИ КП”.

**Аппробация результатов** Результаты работы докладывались и обсуждались на восьмой, девятой, десятой, одиннадцатой и двенадцатой международной НТК студентов и аспирантов “Радиотехника, электроника и энергетика” (Москва, 2002-2006 г.); на НТК ФГУП “РНИИ КП” (Москва, 2003 г.); на III международном симпозиуме “Аэрокосмические технологии” (Санкт-Петербург, 2004 г.); на XI международной НТК “Радиолокация Навигация Связь” (Воронеж, 2005 г.); на III, IV НК “Радиооптические Технологии в Приборостроении” (Сочи, 2005, 2006 г.); на НТК “Инновации в радиотехнических информационно-телекоммуникационных технологиях” (Москва, Россия, 2006 г.).

**Структура и объём работы** По своей структуре диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 181 странице машинописного текста, содержит 92 рисунка, 6 таблиц и список литературы из 61 наименования.

### **Основное содержание работы**

**Во введении** обосновывается актуальность выбранной темы и решаемых задач, формулируется цель исследования, рассматриваются известные подходы к решению поставленных задач, определяется научная новизна и практическая ценность результатов.

**В первой главе** проводится синтез алгоритмов измерений для системы БАМИ. В системе БАМИ используется сигнал с двухуровневой фазовой модуляцией вида:

$$s(t_{k-1,i}) = A \cdot G_{\text{ДК}}(t_{k-1,i} - \tau_{k-1,i}) G_{C,k-1} \cos(\omega_0 \cdot t_{k-1,i} + \varphi_{k-1,i}), \quad (1)$$

где  $A$  - амплитуда сигнала,  $G_{\text{ДК}}(t)$  - дальномерный код, представляющий собой известную функцию, принимающую значения  $\pm 1$ ,  $t_{k-1,i} = T \cdot (k-1) + T_{\text{Д}}i$  - время,  $T = 1$  мс,  $T_{\text{Д}} = 28$  нс,  $G_{C,k-1}$  - модуляция сигнала сообщением - неизвестная функция, принимающая случайные значения  $\pm 1$  с равной вероятностью, меняющая значения в моменты времени  $t_{k-1,0}$ ,  $\omega_0$  - промежуточная частота,  $\tau_{k-1,i}$  - задержка сигнала,  $\varphi_{k-1,i}$  - фаза сигнала.

Система БАМИ работает в нескольких режимах. Интервал работы разделён на преамбулу длительностью 1 с и интервал измерений длительностью

3.55 с. В преамбуле используется дальномерный код с низкой символьной скоростью, а также отсутствует передача данных, что сделано для упрощения процедуры поиска. На интервале измерений осуществляется оценка псевдодальности и взаимной скорости, а также приём двоичного сообщения.

Изменение во времени фазы и задержки сигнала определяется взаимным движением (НС). В работе проведён анализ движения НС, по результатам которого для синтеза приняты следующие модели изменения во времени параметров. Задержка сигнала описывается в виде компоненты трёхмерного марковско-го процесса:

$$\vec{x}_{\tau,k-1} = \mathbf{F}\vec{x}_{\tau,k-1} + \mathbf{G}\xi_{\tau,k-1}, \quad \tau_{k-1} = \mathbf{C}\vec{x}_{\tau,k-1}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{F} = \begin{vmatrix} 1 & T & 0 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$ ,  $\mathbf{G} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ T \end{vmatrix}$ ,  $\mathbf{C} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \end{vmatrix}$  - матрицы,  $\xi_{\tau,k-1}$  - формирующий шум. Аналогично описывается и изменение фазы сигнала.

Необходимо синтезировать систему оценки задержки и взаимной скорости между спутниками, формирующую оценку на 3 с от начала интервала измерений, использующую все доступные измерения. Система распадается на блок оценки параметров в текущий момент времени и блок пересчёта оценок на требуемый момент времени.

Синтез алгоритма оценки в текущий момент времени проводится на основе теории оптимальной нелинейной фильтрации в гауссовском приближении. В результате синтеза получен алгоритм в виде следящего фильтра. Дискриминаторы определяется видом сигнала (1). Сглаживающие фильтры определяются уравнениями априорной динамики процессов (2). Для системы ФАП получен фильтр третьего порядка, позволяющий оценивать фазу и доплеровское смещение частоты сигнала. При синтезе фильтра системы слежения за задержкой (ССЗ) учтена связь между взаимной скоростью спутников  $V_k$  и доплеровским смещением частоты  $\omega_{\text{доп},k}$ :  $\omega_{\text{доп},k} = \frac{\omega_0}{c}V_k$ , где  $\omega_0$  - несущая частота сигнала,  $c$  - скорость света. Синтезирован комплексный фильтр системы ССЗ. Структура полученных систем фильтрации изображена на рис. 1.

При синтезе блока пересчёта измерений на 3 с вводится расширенный вектор состояния, содержащий оценку параметров сигнала на текущий момент времени и на требуемый момент времени. Система распадается на блок фильтрации, рассмотренный выше, и блок интерполяции, формирующий оценку па-

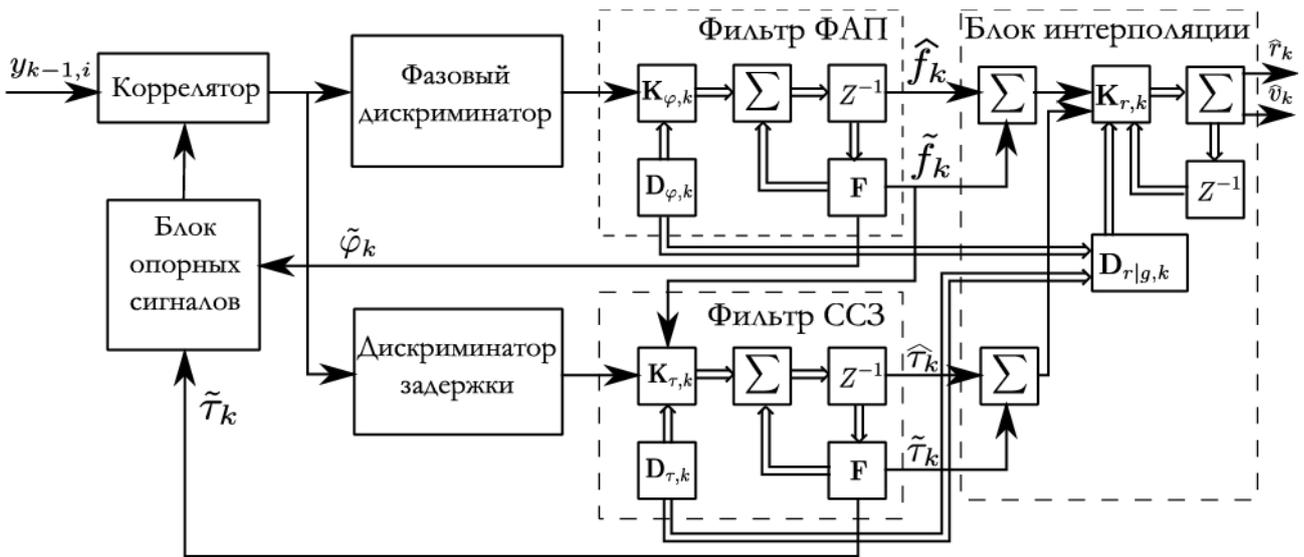


Рис. 1: Структура систем фильтрации и интерполяции БАМИ

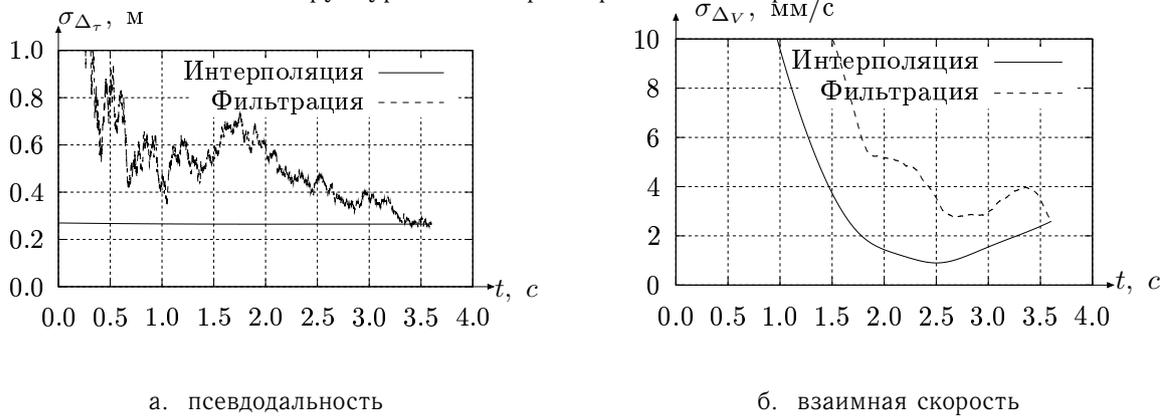


Рис. 2: Точность оценки параметров сигнала

раметров на требуемый момент времени с использованием оценок параметров, матрицы дисперсии оценок и коэффициентов фильтров, получаемых из блока фильтрации. Структура системы изображена на рис. 1. Отличием данной системы интерполяции от известных из литературы является то, что она комплексная — учитывающая два измерения (задержки и доплеровской частоты).

Создана математическая модель системы БАМИ, в которой при формировании сигнала псевдодалность и скорость рассчитывается на основе модели взаимного движения НС. На рис. 2 изображены полученные зависимости точность оценки псевдодалности и скорости. В последней точке графика точности интерполяционной и фильтрационной оценок совпадают, а для любой предшествующей точки интерполяционная оценка оказывается точнее. Использование алгоритма интерполяции позволило повысить точность оценки псевдодалности на 30 %, а точность оценки взаимной скорости - на 32 %. Синтезированный алгоритм фильтрации-интерполяции обеспечивает на заданный момент

времени (3 с) точность по псевдодальности  $\sigma_r = 0.27$  м, по взаимной скорости  $\sigma_v = 1.7$  мм/с, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к системе.

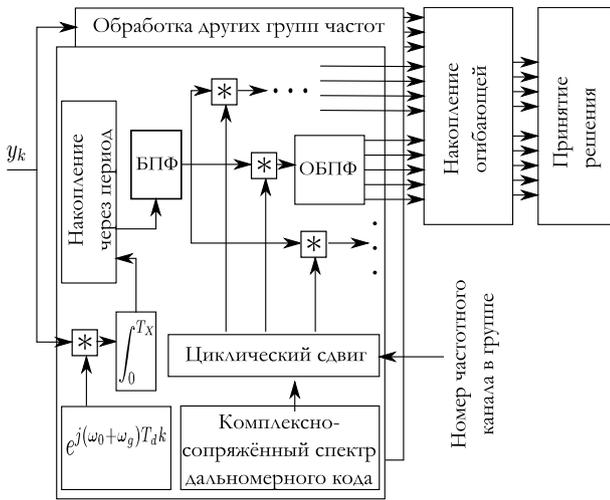
**Во второй главе** рассматривается задача быстрого поиска сигналов системы БАМИ в условиях отсутствия информации о параметрах сигнала и перечне НС, излучающих в данный момент сигнал, с минимальными, по возможности, вычислительными затратами. В системе одновременно на передачу работают 6 НС из 24. Время поиска ограничено длительностью преамбулы сигнала — 1 с. Необходимо обнаружить 6 вероятностью не ниже 0.95. Диапазон доплеровского смещения частоты сигналов составляет  $\pm 45$  кГц, а отношение мощности сигнала к спектральной плотности шума  $q_c/n_0 = 34$  дБГц.

Поиск заключается в оценке факта наличия сигнала и оценке информативных параметров, включающих частоту и задержку. В соответствии со статистической теорией радиосистем для решения задачи необходимо максимизировать функцию правдоподобия сигнала, усреднённую по всем неизвестным параметрам. Усреднение по амплитуде и начальной фазе проводится аналитически. Усреднение по частоте и задержке аналитически не осуществимо. Поэтому используется прямой поиск экстремума функции правдоподобия, для чего область возможных значений частоты и задержки разбивается на множество ячеек, в каждой из которых рассчитывается значение функции правдоподобия. Учитывая монотонность функции логарифма, вместо функции правдоподобия анализируется её логарифм. Усреднение по случайной начальной фазе приводит к схеме накопления в корреляторе с двумя квадратурными каналами.

Анализ показал, что при использовании одноканального коррелятора время поиска составит  $3 \cdot 10^4$  с. Уменьшить время можно, используя много каналов коррелятора, что потребует слишком больших аппаратных затрат. Рассматривается использование специализированных алгоритмов с меньшей вычислительной сложностью. Известен алгоритм поиска сигнала по задержке, использующий теорему о свёртке сигналов в спектральной области. Сначала осуществляется предварительное накопление сигнала на длительности ячейки поиска по задержке, затем — перевод обработки в спектральную область. Поиск по задержке осуществляется умножением на спектр опорного сигнала, а поиск по частоте — циклическим смещением спектра. Если на интервале накопления несколько периодов дальномерного кода, объём вычислений можно сократить.

Предлагается модификация алгоритма, отличающаяся от известного тем,

что, используя свойство периодичности искомого кода, осуществляется накопление соответствующих ячеек дальномерного кода через период, в результате чего достигается минимальный требуемый объём ДПФ. Структура алгоритма приведена на рис. 3. Проведено моделирование разработанного алгоритма, продемонстрировавшее его работоспособность.



Алгоритм реализован в виде блока быстрого поиска программного приёмника сигналов GPS, решающего задачу поиска в режиме “холодный старт” (поиск 32 сигналов в диапазоне  $\pm 12.5$  кГц при времени накопления  $8 \times 2$  мс) за 1.5 с, на что традиционному 32-канальному приёмнику потребуется 27 минут.

**В третьей главе** рассматривается

Рис. 3: Структура блока быстрого поиска

задача приёма навигационного сигнала с комбинированным видом модуляции, содержащим навигационное и телеметрическое сообщения. Телеметрические данные передаются совместно с навигационным сигналом путём модуляции сигнала в определённые моменты времени. Передаваемый сигнал имеет вид:

$$s(t) = A \cdot G_{\text{мод}}(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

где  $A$ ,  $\omega_0$ ,  $\varphi_0$  - амплитуда, частота и фаза сигнала, а функция  $G_{\text{мод}}(t)$  определяет двухуровневую фазовую модуляцию сигнала и равна:

$$G_{\text{мод}}(t) = G_{\text{НС}}(t)G_{\text{ДК}}(t) \cdot G_{\text{СТР}}(t) + G_{\text{НС}}(t)G_{\text{ДК}}(t) \cdot (G_{\text{ТЛ}}(t) \cdot G_{\text{МН}}(t) - 1) \cdot (1 - G_{\text{СТР}}(t)),$$

где  $G_{\text{ДК}}(t)$  - дальномерный код сигнала,  $G_{\text{НС}}(t)$  - навигационное сообщение,  $G_{\text{ТЛ}}(t)$  - телеметрическое сообщение,  $G_{\text{МН}}(t)$  - меандр,  $G_{\text{СТР}}(t)$  - стробирующая функция, определяющая моменты передачи телеметрических данных.

Синтезирован оптимальный алгоритм слежения. Структура дискриминаторов фазы и задержки изображены на рис. 4. Разработан алгоритм выделения телеметрического и навигационного сообщений.

Для подтверждения работоспособности разработанного алгоритма создана математическая модель на ЭВМ, с использованием которой получена зависимость вероятности ошибочного приёма символа, изображённая на рис. 5. Достаточная вероятность ошибки 0.1 достигается при отношении мощности сигнала

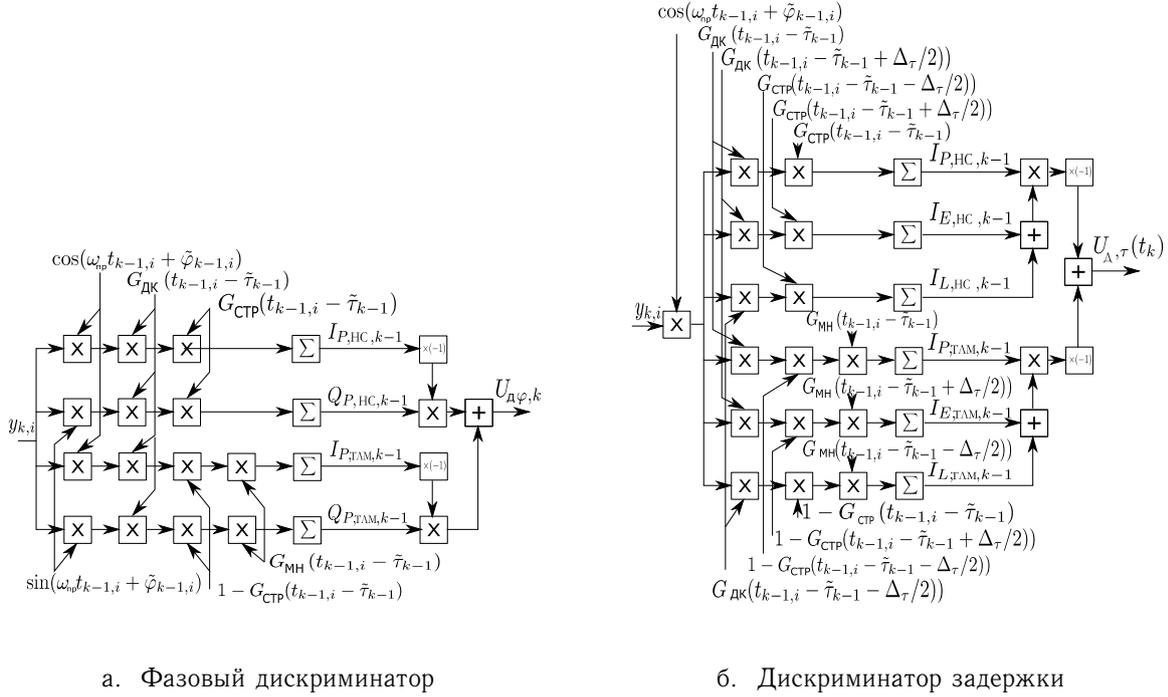


Рис. 4: Структура дискриминаторов

к спектра  $q_c/n_0 = 47$  дБГц, что удовлетворяет требованиям задания.

**В четвёртой главе** рассматривается задача защиты приёмника навигационного сигнала с комбинированным видом модуляции от узкополосных помех. На вход системы обработки сигнала в дискретном времени поступает смесь сигнала, помех и шума:  $\dot{y}_k = \dot{S}_{c,k} + \sum_{i=1}^M \dot{S}_{п,i,k} + \dot{n}_k$ , где  $\dot{S}_{c,k}$  - комплексный полезный сигнал,  $\dot{S}_{п,i,k} = A \cdot e^{j(2\pi f_{п,i} T_{Дк} + \varphi_k)}$  - узкополосная помеха,  $\dot{n}_k$  - дискретный белый гауссовский шум.

Рассмотрим компенсационную структуру алгоритма обработки наблюдений:  $\dot{\eta}_k = \dot{y}_k - \hat{S}_{п,k}$ , где  $\hat{S}_{п,k}$  - оценка помехового сигнала, формируемая линейным фильтром:  $\hat{S}_{п,k} = \sum_{j=1}^n \beta_j \cdot \dot{y}_{k-j}$ , где  $\beta_j$  - коэффициенты фильтра,  $n$  - их количество. При известном количестве помех и их параметров вектор оптимальных коэффициентов, минимизирующий мощность помеховых сигналов в  $\dot{\eta}_k$  определяется выражением

$$\hat{\beta} = \mathbf{R}_Z^{-1} \mathbf{R}_Z S_{п}, \quad \mathbf{R}_Z = M \left[ \dot{\mathbf{Z}}_{п,k-1,n} \dot{\mathbf{Z}}_{п,k-1,n}^* \right], \quad \mathbf{R}_Z S_{п} = \sum_{l=1}^M \dot{S}_{п,l,k}^* M \left[ \dot{\mathbf{Z}}_{п,k-1,n} \right],$$

где  $\dot{\mathbf{Z}}_{п,k-1,n} = \sum_{i=1}^L \dot{S}_{п,k-1,n} + \dot{\mathbf{n}}_{k-1,n}$  - вектор отсчётов помеховой составляющей

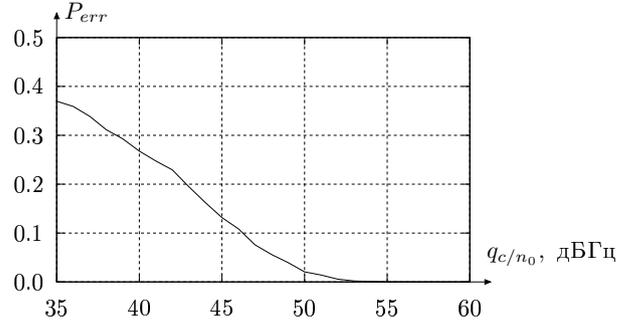


Рис. 5: Вероятность ошибочного приёма сигнала телеметрического сообщения

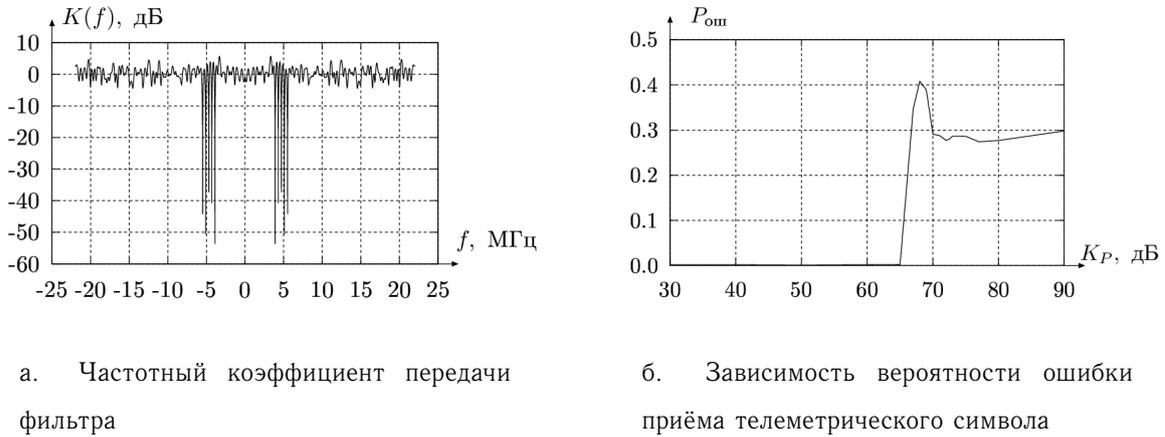


Рис. 6: Результат обработки 5 гармонических помех

длиной  $n$ , предшествующих текущему моменту. Если параметры входной помехи не известны, необходимо использовать алгоритм адаптации коэффициентов фильтра. При большом уровне помехи можно заменить корреляционные матрицы помеховой составляющей  $\mathbf{Z}$  на корреляционные матрицы входного процесса  $\mathbf{Y}$ :  $\hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{Y}} = \frac{1}{L} \sum_{\nu=1}^L \mathbf{Y}_{k-\nu-1,n} \mathbf{Y}_{k-\nu-1,n}^{*T}$ ,  $\hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{Y}y_k} = \frac{1}{L} \sum_{\nu=1}^L y_{p,k}^* \mathbf{Y}_{p,k-\nu-1,n}$ . где  $\mathbf{Y}_{p,i,n}$  - выборка входного процесса длиной  $n$ .

Вычисление коэффициентов фильтра связано с операциями формирования корреляционной матрицы  $\mathbf{R}_{\mathbf{Y}}$  и решения системы линейных уравнений относительно  $\hat{\beta}$ , что требует очень больших вычислительных ресурсов при количестве отводов фильтра, равном несколько сотен. Разработан алгоритм вычисления коэффициентов, позволяющий избежать формирования матрицы  $\mathbf{R}_{\mathbf{Y}}$  и снизить требуемое количество операций по решению системы линейных уравнений. Данный алгоритм является модификацией градиентного алгоритма решения системы линейных уравнений и относится к классу итеративных алгоритмов.

Создана математическая модель алгоритма, с использованием которой получена зависимость вероятности ошибки приёма телеметрического символа от отношения мощности помехи к мощности сигнала при различном типе помех. На рис. 6 изображена АЧХ фильтра и зависимость вероятности ошибочного приёма символа при воздействии 5 гармонических помех на систему с адаптивным трансверсальным фильтром. Требуемая вероятность ошибки 0.1 достигается при отношении мощности помех к мощности сигнала 65 дБ, что на 35 дБ больше, чем у незащищённого приёмника.

## Основные результаты работы и выводы

1. Проведён анализ взаимного движения НС, на основе которого обоснована полиномиальная модель изменения взаимной дальности, которая используется при синтезе алгоритмов измерений системы БАМИ;
2. Методами теории оптимальной фильтрации проведён синтез алгоритмов оценки дальности и скорости на заданный момент времени с обработкой всех доступных наблюдений, включающих алгоритмы комплексной фильтрации (слежения) фазы и задержки кода сигнала БАМИ и алгоритм интерполяции фильтрационных оценок псевдодальности и скорости на заданный момент времени (3 с от начала интервала измерений).
3. По дисперсионным уравнениям проведён анализ точности работы синтезированных систем фильтрации фазы и задержки, а также блока интерполяции измерений, продемонстрировавший, что точность оценки фильтрации скорости на требуемый момент (3 с от начала интервала измерений) составила 3 мм/с, псевдодальности — 0.33 м. Применение алгоритма интерполяции позволило получить требуемую точность оценки псевдодальности 0.3 м, а точность оценки скорости возросла до 1.7 мм/с.
4. Для численного моделирования и оценки характеристик с учётом траекторий движения НС на ЭВМ создана математическая модель системы БАМИ. Продемонстрировано отсутствие систематической составляющей оценок псевдодальности и взаимной скорости. Точность фильтрационной оценки псевдодальности составила 0.39 м, точность оценки скорости — 2.5 мм/с. Точность интерполяции оценки псевдодальности к требуемому моменту времени составила 0.27 м, скорости — 1.7 мм/с, что удовлетворяет требованиям по точности к системе БАМИ. Блок интерполяции повысил точность оценки взаимной скорости на 40 %, псевдодальности - на 30 %.
5. Разработан алгоритм быстрого поиска сигналов БАМИ. Проведён анализ необходимого времени поиска, в результате чего сделан вывод о том, что поиск сигнала на основе традиционной структуры с многоканальными корреляторами займёт слишком много времени, и необходимо создать специализированный блок быстрого поиска.
6. Предложен алгоритм вычисления корреляционных интегралов при поиске, отличающийся от известного отсутствием избыточности вычислений, что упрощает его реализацию и сокращает объём вычислительных затрат.

7. Создана модель блока поиска сигнала, демонстрирующая его работоспособность. Показано, что разработанный алгоритм при заданной энергетике сигнала ( $q_{c/n_0} = 34$  дБГц) позволяет достичь вероятности правильного обнаружения  $P_D = 0.9$  при длительности накопления в корреляторе  $T = 6.3$  мс и количестве накапливаемых отсчётов квадрата огибающей  $NN = 5$ .
8. Предложенный алгоритм быстрого поиска реализован в программном навигационном приёмнике, разработанном и созданном при участии автора.
9. Показано, что с программный приёмник выполняет задачу обнаружения в режиме “холодный старт” (при отсутствии априорной информации) за 1.5 секунды, в то время, как традиционный навигационный приёмник с 32-канальным коррелятором способен выполнить данную задачу за 27 минут.
10. Проведён синтез оптимальных алгоритмов приёма навигационного сигнала с комбинированным видом модуляции, включающих алгоритмы слежения за фазой и дальномерным кодом и алгоритмы выделения навигационного и телеметрического сообщений. Приведена структура приёмника.
11. Проведён сравнительный анализ точности алгоритмов слежения за фазой и дальномерным кодом навигационного сигнала с комбинированным законом модуляции, показавший, что синтезированный алгоритм на 6 % эффективнее по точности оценки фазы по сравнению с алгоритмом, не использующим телеметрическую часть сигнала. Выигрыш по точности оценки частоты составил 4 %, а точность оценки задержки осталась прежней.
12. Создана имитационная модель системы приёма навигационного сигнала с комбинированным видом модуляции, демонстрирующая работоспособность синтезированного алгоритма.
13. При моделировании определено, что точность оценки фазы и задержки дальномерного кода навигационного сигнала с комбинированным видом модуляции соответствует расчётной (на основе решения дисперсионных уравнений) и составляет: СКО оценки фазы — 0.05 рад, частоты — 0.05 Гц, задержки — 2 нс. Рассчитана вероятность ошибки приёма символов телеметрического сообщения. Показано, что требуемая вероятность ошибки 0.1 достигается при  $q_{c/n_0} = 47$  дБГц.
14. Проведён анализ влияния дополнительной модуляции навигационного сигнала телеметрическим сообщением на стандартные навигационные приёмники, показавший, что точность оценки задержки снижается на 6 %.

15. Проведён синтез системы подавления помех в форме адаптивного трансверсального фильтра при воздействии нескольких узкополосных помех.
16. Получены формулы для расчёта коэффициента передачи и дисперсии процесса на выходе фильтра. Проведён анализ работы трансверсального фильтра при воздействии одной гармонической помехи, показавший, что при 140 отводах фильтра обеспечивается подавление помехи на 130 дБ (в идеальных условиях). Проанализировано искажение полезного сигнала в фильтре.
17. Разработан алгоритм быстрого вычисления коэффициентов адаптивного трансверсального фильтра в форме комбинации алгоритма накопления корреляционной матрицы входного воздействия и метода сопряжённых градиентов решения систем линейных уравнений. Продемонстрировано, что использование предложенного алгоритма сокращает требуемые для реализации вычислительные затраты и объём памяти.
18. Разработана математическая модель на ЭВМ алгоритма подавления помех, работающая совместно с моделью приёмника навигационного сигнала с комбинированным видом модуляции.
19. Проведено численное моделирование работы адаптивного трансверсального фильтра при воздействии одной узкополосной помехи. Количество отводов фильтра 128, сигнал поступает с 12-разрядного АЦП. Показано, что достигается подавление гармонической помехи на 42 дБ. При воздействии помехи с полосой 10 кГц уровень подавления составляет 36 дБ. При воздействии 5 гармонических помех, распределённых равномерно в полосе полезного сигнала, уровень подавления достигает 35 дБ.
20. Проведено численное моделирование работы адаптивного трансверсального фильтра при воздействии помехи с полосой 400 кГц (10 % полосы полезного сигнала). Количество отводов фильтра увеличено до 512. Показано, что коэффициент подавления помехи в этом случае достигает 35 дБ.
21. Совместно с “НИИ космического приборостроения” создан макет трансверсального фильтра, на котором продемонстрирована работоспособность алгоритма адаптации. Экспериментально полученные амплитудно-частотные характеристики фильтра соответствуют расчётным.
22. Разработанный алгоритм подавления узкополосных помех может быть применён в стандартной аппаратуре спутниковой навигации, требующей дополнительные средства помехозащиты.

**Основное содержание диссертационной работы изложено в следующих публикациях:**

1. *Перов А. И., Болденков Е. Н.* Анализ помехоустойчивости системы ФАП приемника спутниковых радионавигационных систем // *Радиотехнические тетради.* — 2002. — № 22. — С. 46–50.
2. *Перов А. И., Болденков Е. Н., Григоренко Д. А.* Упрощённая аналитическая методика оценки потенциальной помехоустойчивости оптимальных следящих систем приёмников спутниковой навигации. // *Радиотехника.* — 2003. — № 7. — С. 79–87.
3. *Перов А. И., Перов А. А., Болденков Е. Н.* Статистический анализ комбинированной схемы слежения за фазой сигнала в приемниках спутниковой навигации // *Радиотехника.* — 2004. — № 7. — С. 97–103.
4. *Перов А. И., Болденков Е. Н.* Синтез алгоритмов слежения за параметрами сигналов в бортовой аппаратуре межспутниковых измерений // *Радиотехника.* — 2005. — № 7. — С. 15–20.
5. Использование весовых функций для предварительной обработки шумоподобных сигналов при наличии сильных интерференционных помех / Р. В. Бакитько, В. П. Польщиков, А. И. Шилов, Я. Д. Хацкелевич, Е. Н. Болденков // *Радиотехника.* — 2006. — № 6. — С. 13–17.
6. *Перов А. И., Болденков Е. Н.* Исследование алгоритмов интерполяции комплексных оптимальных оценок в системе межспутниковых измерений // *Радиотехника.* — 2006. — № 7. — С. 84–88.
7. *Перов А. И., Болденков Е. Н.* Исследование адаптивных трансверсальных фильтров для приёмников спутниковой радионавигации при воздействии узкополосных помех // *Радиотехника.* — 2006. — № 7. — С. 98–105.
8. *Перов А. И., Болденков Е. Н.* Сравнительный анализ различных алгоритмов слежения за фазой сигнала в приёмниках СРНС ГЛОНАСС // Сборн. тез. докл. на III междунар. симпозиуме 'Аэрокосмические технологии'. — Санкт-Петербург: ГУАП, 2004. — С. 61–63.
9. *Перов А. И., Болденков Е. Н.* Исследование и оптимизация алгоритмов обработки сигналов в бортовой аппаратуре межспутниковых измерений // Сборн. докл. на XI междунар. НТК 'Радиолокация Навигация Связь'. — Т. 3. — Воронеж: НПФ-САКВОЕЕ, 2005. — С. 1366–1375.
10. *Перов А. И., Болденков Е. Н.* Исследование помехоустойчивости систем

- ФАП с синусоидальными и фазоманипулированными сигналами // Сборн. тез. докл. на 8 междунар. НТК студентов и аспирантов 'Радиотехника, электроника и энергетика'. — Т. 1. — М.: Издательство МЭИ, 2002. — С. 114.
11. *Перов А. И., Болденков Е. Н.* Анализ характеристик системы слежения за фазой сигнала в цифровых приемниках спутниковых навигационных систем // Сборн. тез. докл. на 9 междунар. НТК студентов и аспирантов 'Радиотехника, электроника и энергетика'. — Т. 1. — М.: Издательство МЭИ, 2003. — С. 104.
  12. *Перов А. И., Болденков Е. Н.* Анализ помехоустойчивости оптимальных следящих систем приемника сигналов СРНС // Сборн. тез. докл. НТК ФГУП 'РНИИКП'. — М.: Издательство РНИИКП, 2003. — С. 41.
  13. *Перов А. И., Болденков Е. Н.* Сравнительный анализ характеристик когерентных и некогерентных приёмников СРНС ГЛОНАСС // Сборн. тез. докл. на 10 междунар. НТК студентов и аспирантов 'Радиотехника, электроника и энергетика'. — Т. 1. — М.: Издательство МЭИ, 2004. — С. 111.
  14. *Перов А. И., Болденков Е. Н.* Оптимизация схем слежения за параметрами сигнала в бортовой аппаратуре межспутниковой синхронизации // Сборн. тез. докл. на 11 междунар. НТК студентов и аспирантов 'Радиотехника, электроника и энергетика'. — Т. 1. — М.: Издательство МЭИ, 2005. — С. 120–121.
  15. *Перов А. И., Болденков Е. Н.* Оптимизация алгоритмов оценки параметров сигналов бортовой системы межспутниковых измерений в условиях ограниченного времени наблюдения // Сборн. докл. на 7 всероссийской НТК молодых учёных и студентов "Современные проблемы радиоэлектроники". — Т. 1. — Красноярск.: Издательство КРГТУ, 2005. — С. 485–488.
  16. *Перов А. И., Болденков Е. Н.* Анализ работы приёмника СРНС в режиме слежения при использовании весовых функций в системе обработки наблюдений с сильными узкополосными помехами // Тез. докл. на III НК 'Радиооптические Технологии в Приборостроении'. — Сочи: МГТУ им. Баумана, 2005. — С. 157.
  17. *Перов А. И., Болденков Е. Н.* Оптимизация структуры сигнала системы БАМИ с целью быстрого вхождения в синхронизм // Сборн. тез. докл. на 12 междунар. НТК студентов и аспирантов 'Радиотехника, электроника и энергетика'. — Т. 1. — М.: Издательство МЭИ, 2006. — С. 145–147.

18. *Перов А. И., Болденков Е. Н.* Оптимальная интерполяция измерений // Инновации в радиотехнических информационно-телекоммуникационных технологиях. Сборник докладов. — Т. 1. — М.: Экстра-принт, 2006. — С. 215–220.
19. *Шатилов А. Ю., Болденков Е. Н., Перов А. А.* Программный приёмник сигналов GPS // Инновации в радиотехнических информационно-телекоммуникационных технологиях. Сборник докладов. — Т. 1. — М.: Экстра-принт, 2006. — С. 220–229.
20. *Перов А. И., Болденков Е. Н.* Программный приёмник GPS // Тез. докл. на IV НК “Радиооптические Технологии в Приборостроении”. — Сочи: МГТУ им. Баумана, 2006. — С. 150.
21. *Перов А. И., Болденков Е. Н.* Исследование комплексного алгоритма интерполяции в системе спутниковых измерений // Сборн. докл. на 8 всероссийской НТК молодых учёных и студентов “Современные проблемы радиоэлектроники”. — Т. 1. — Красноярск: Издательство КРГТУ, 2006. — С. 512–515.