

*На правах рукописи*

*Слесарев*

**Слесарев Алексей Сергеевич**

**ЭФФЕКТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ  
ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ В УСТРОЙСТВАХ ПОИСКА,  
ОБНАРУЖЕНИЯ И СЛЕЖЕНИЯ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ  
ИНФОРМАЦИИ ПРИ ДЕЙСТВИИ МЕШАЮЩИХ ФАКТОРОВ**

Специальность: 05.12.04 -  
«Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Рязань – 2009

Работа выполнена в ГОУ ВПО  
«Рязанский государственный радиотехнический университет»

- Научный руководитель - заслуженный работник ВШ РФ,  
доктор технических наук, профессор  
Кириллов Сергей Николаевич
- Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор  
Рубцов Виталий Дмитриевич
- кандидат технических наук, доцент  
Авдеев Валерий Васильевич
- Ведущая организация - ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» -  
ОКБ «Спектр» (г. Рязань)

Защита состоится « 19 » июня 2009 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.211.04 в ГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Автореферат разослан « 13 » мая 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук



А.Г. Борисов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время наблюдается большой интерес к спутниковым системам передачи информации (ССПИ). Основными этапами функционирования приемника ССПИ являются поиск и обнаружение, а также захват и последующее устойчивое слежение за параметрами сигнала. Большой вклад в развитие теорий обнаружения и синхронизации внесли отечественные и зарубежные ученые Л.А. Вайнштейн, Я.Д. Ширман, Ю.Г. Сосулин, Л.М. Финк, Л.Е. Варакин, В.В. Шахгильдян, Г.И. Тузов, А.И. Перов, Э.Д. Витерби, Г. Ван Трис, В. Линдсей и др.

По мере совершенствования элементной базы все чаще применяется программная реализация алгоритмов обработки сигналов ССПИ. В отличие от аппаратной реализации, программная реализация позволяет легко перестраивать алгоритмы поиска, обнаружения и слежения в соответствии с изменением помеховой обстановки и условий распространения сигнала в зависимости от приоритетной задачи. Кроме того, обеспечивается низкая стоимость и быстрота модернизации ССПИ при переходе на новые типы сигналов.

При использовании программной реализации временные затраты на обработку сигнала существенно зависят от количества выполняемых вычислительных операций. Поэтому представляет интерес разработка алгоритмов поиска, обнаружения и слежения за параметрами сигнала ССПИ, обеспечивающих снижение вычислительных затрат. Это позволит уменьшить время вхождения в синхронизм, являющееся важным показателем качества ССПИ, а также снизить требования к быстродействию элементной базы и производительности процессора, что обеспечит уменьшение стоимости аппаратуры.

В современных и перспективных ССПИ большое внимание уделяется повышению устойчивости к действию мешающих факторов: преднамеренных и непреднамеренных помех, большого диапазона изменения доплеровского сдвига частоты сигнала, низкого отношения сигнал-шум, а также многолучевого распространения сигнала. В связи с этим в ССПИ применяются многоканальные, адаптивные и робастные алгоритмы обработки, а также алгоритмы с накоплением сигнала. Кроме того, в ССПИ используются широкополосные сигналы, чаще всего фазоманипулированные с расширением спектра модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью (ПСП), которые позволяют успешно бороться с рядом мешающих факторов, а также дают возможность осуществить кодовое разделение каналов передачи информации в общей полосе частот. Простейшим видом фазоманипулированных сигналов является бинарный фазоманипулированный (ФМн-2) сигнал.

Программная реализация алгоритмов поиска и обнаружения сигнала ССПИ чаще всего выполняется на основе вычисления взаимной корреляционной функции (ВКФ) принятой реализации и опорного сигнала с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ). Известен алгоритм поиска и обнаружения широкополосного ФМн-2 сигнала ССПИ на основе одноуровневого вейвлет-пакетного разложения (ВПР) в базе Хаара и БПФ, позволяющий примерно в 2 раза снизить количество вычислительных операций при незначительном ухудшении характеристик обнаружения. При этом не учитывается воздействие узкополосных помех (УП), являющихся одним из наиболее распространенных видов мешающих воздействий. Для борьбы с УП в ССПИ часто используется фильтрация, однако при программной реализации алгоритмов обработки сигнала применение фильтрации приводит к увеличению вычислительных за-

трат. Поэтому актуальна задача разработки алгоритмов поиска, обнаружения и слежения за параметрами сигнала ССПИ, обеспечивающих уменьшение количества вычислительных операций в условиях действия УП.

Одним из методов повышения устойчивости систем передачи информации к действию помех является адаптивное линейное предсказание и корректирование сигнала, которое в ряде случаев позволяет значительно повысить эффективность ССПИ по сравнению с использованием оптимальной линейной фильтрации. Однако предложенные в известных работах алгоритмы расчета предсказывающего и корректирующего фильтров обладают рядом существенных недостатков. В связи с этим представляет интерес задача повышения эффективности алгоритма поиска и обнаружения сигнала ССПИ с использованием адаптивного линейного предсказания и корректирования.

Одним из основных элементов системы слежения приемника ССПИ, значительно влияющим на помехоустойчивость, является контур фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). К перспективным ССПИ предъявляются требования по уменьшению ошибки слежения и снижению времени установления режима синхронизма, поэтому важной является задача оптимизации контура ФАПЧ по нескольким показателям качества. Кроме того, представляет интерес задача исследования действия различного рода преднамеренных и непреднамеренных помех на цифровые системы слежения ССПИ.

**Цель работы.** Целью данной работы является разработка эффективных алгоритмов поиска, обнаружения и слежения за параметрами широкополосных фазоманипулированных сигналов ССПИ, обеспечивающих повышение устойчивости к действию мешающих факторов, а также снижение вычислительных затрат при программной реализации.

Поставленная цель работы включает решение следующих задач:

1 Разработка адаптивного к действию УП быстрого алгоритма поиска и обнаружения ФМн-2 сигнала ССПИ на основе ВПР и БПФ, требующего меньшего количества арифметических операций, чем быстрый алгоритм на основе ВПР и БПФ с использованием оптимальной линейной фильтрации.

2 Модификация алгоритма фильтрации в составе быстрого алгоритма поиска и обнаружения ФМн-2 сигнала ССПИ на основе ВПР и БПФ в условиях действия УП, позволяющая снизить объем вычислительных затрат.

3 Повышение эффективности алгоритма поиска и обнаружения ФМн-2 сигнала ССПИ на основе БПФ при воздействии помех с ограниченным спектром с использованием адаптивного линейного предсказания и корректирования сигнала.

4 Анализ воздействия различного рода помех на систему слежения ССПИ, а также разработка рекомендаций по борьбе с наиболее опасными видами помеховых воздействий.

5 Оптимизация контура ФАПЧ системы слежения ССПИ по нескольким показателям качества, а также придание контуру ФАПЧ свойств робастности к изменению условий приема сигнала.

6 Разработка процедуры синтеза линейного фильтра, предназначенного для фильтрации сигнала ССПИ перед подачей на контуры слежения в условиях действия УП, который требует меньшего объема вычислительных затрат и обеспечивает повышение показателей качества ССПИ.

7 Разработка алгоритма поиска и обнаружения ФМн-2 сигнала ССПИ на основе БПФ при низком отношении сигнал-шум, обеспечивающего снижение объема памяти приемника.

8 Анализ эффективности практической реализации предложенных алгоритмов поиска, обнаружения и слежения за параметрами сигнала ССПИ при использовании современной элементной базы.

**Методы исследования.** В работе использовались методы статистической радиотехники и математической статистики, вариационного, матричного исчисления и вычислительной математики, а также современные алгоритмы цифровой обработки сигналов. Данные теоретические методы сочетались с экспериментальными исследованиями на основе имитационного моделирования.

**Научная новизна.** В рамках диссертационной работы получены следующие новые научные результаты:

1 Разработан алгоритм поиска и обнаружения ФМн-2 сигнала ССПИ на основе одноуровневого ВПР в базе Хаара и БПФ, обеспечивающий устойчивость к действию УП путем адаптивного выбора ветви ВПР и формирования опорных сигналов, при этом вычислительные затраты снижаются на 15..50 % по сравнению с аналогичным алгоритмом, в котором для борьбы с УП применяется оптимальный линейный фильтр.

2 Произведена модификация алгоритма фильтрации в частотной области для алгоритма поиска и обнаружения ФМн-2 сигнала ССПИ на основе ВПР и БПФ в условиях действия УП, позволяющая на 15..19 % снизить объем вычислительных затрат без ухудшения других характеристик алгоритма поиска и обнаружения.

3 Предложен алгоритм поиска и обнаружения сигнала ССПИ на основе БПФ с использованием адаптивного линейного предсказания и корректирования, обеспечивающий повышение устойчивости к действию белого гауссовского шума (БГШ) в условиях воздействия помех с ограниченным спектром до 3..3,5 дБ по сравнению с применением оптимальной линейной фильтрации.

4 Проведен анализ эффективности воздействия на систему слежения ССПИ различных видов помех, определены оптимальные параметры наиболее опасных помех. Показано, что мощность имитационной помехи может быть на 10..20 дБ ниже мощности ретранслированной помехи при равной степени воздействия на систему слежения ССПИ. Установлены возможные методы борьбы с данными помехами в приемнике ССПИ.

5 Обоснован критерий оптимальности при синтезе петлевого фильтра контура ФАПЧ с астатизмом 2-го порядка системы слежения ССПИ, включающий несколько показателей качества. Обеспечена робастность ССПИ к изменению отношения сигнал-шум в диапазоне от -30 дБ до -10 дБ.

6 Разработана процедура синтеза оптимального по критерию минимума среднеквадратической ошибки (СКО) линейного фильтра с симметричной импульсной характеристикой, обеспечивающего выигрыш на 7..22 % по количеству вычислительных операций при программной реализации алгоритма слежения в приемнике ССПИ в условиях воздействия УП, а также снижение среднеквадратического отклонения фазовой ошибки в контуре ФАПЧ до 2..3 раз при низком порядке фильтра.

7 Разработан алгоритм поиска и обнаружения ФМн-2 сигнала ССПИ при низком отношении сигнал-шум на основе суммирования ВКФ, обеспечивающий снижение объема памяти, необходимого для хранения отсчетов ВКФ, до 1,7..2 раз при

уменьшении вероятности правильного обнаружения и оценки параметров сигнала с допустимой точностью не более чем на 1..2 %.

**Достоверность.** Достоверность полученных в диссертационной работе результатов и выводов обеспечивается качественным и количественным сопоставлением результатов имитационного моделирования с известными положениями теории обработки сигналов.

**Практическая ценность работы.** Представленные в работе алгоритмы поиска и обнаружения сигнала, а также алгоритмы слежения могут быть использованы в существующих и перспективных ССПИ в режиме вхождения в синхронизм и передачи различного рода информации (радиотелеметрия, команды управления и др.) при действии таких мешающих факторов, как преднамеренные и непреднамеренные помехи, изменение условий распространения сигнала в радиоканале, высокая динамика взаимного перемещения передатчика и приемника ССПИ и т.п. Результаты диссертационной работы нашли применение в действующей аппаратуре ФГУП «Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения», что подтверждено соответствующим актом.

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

1 Устойчивый к действию УП быстрый алгоритм поиска и обнаружения ФМн-2 сигнала ССПИ с адаптивным формированием опорных сигналов и выбором ветви одноуровневого ВПР в базе Хаара, обеспечивающий снижение вычислительных затрат на 15..50 % по сравнению с аналогичным алгоритмом на основе оптимальной линейной фильтрации.

2 Алгоритм поиска и обнаружения ФМн-2 сигнала ССПИ с использованием адаптивного линейного предсказания и корректирования, обеспечивающий повышение устойчивости к действию БГШ в условиях воздействия помехи с ограниченным спектром до 3..3,5 дБ по сравнению с применением оптимальной линейной фильтрации.

3 Процедура синтеза оптимального по критерию минимума СКО симметричного линейного фильтра, обеспечивающего выигрыш на 7..22 % по количеству вычислительных операций при программной реализации алгоритма слежения в приемнике ССПИ в условиях воздействия УП, а также снижение среднеквадратического отклонения фазовой ошибки в контуре ФАПЧ до 2..3 раз при низком порядке фильтра.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались на следующих конференциях:

1 13-я, 14-я, 15-я Международная научно-техническая конференция «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» 2004, 2005, 2008 гг., г. Рязань.

2 7-я и 9-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение» 2005, 2007 гг., г. Москва.

3 Всероссийский научно-практический семинар «Сети и системы связи» 2005 г., г. Рязань.

4 X, XI, XII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов "Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании" 2005, 2006, 2007 гг., г. Рязань.

5 31-я Межвузовская научно-практическая конференция «Информационные технологии, сети, системы связи и телекоммуникации» 2006 г, г. Рязань.

6 Научная сессия МИФИ-2007, г. Москва.

7 5-я международная научно-техническая конференция "К.Э. Циолковский - 150 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика" 2007 г., г. Рязань.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 19 работ. Из них 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ для кандидатских диссертаций, 1 статья в межвузовском сборнике, 12 тезисов докладов на конференциях.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 167 наименований и 2 приложений. Диссертация содержит 177 страниц, в том числе 117 страниц основного текста, и 45 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы; определены цели и задачи, рассматриваемые в диссертационной работе. Перечислены новые научные результаты, полученные в данной работе; представлены её практическая ценность и апробация; сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** предложены эффективные при действии помех алгоритмы поиска и обнаружения широкополосного фазоманипулированного сигнала ССПИ с использованием оптимальной линейной фильтрации, адаптивного формирования опорного сигнала, а также линейного предсказания и корректирования.

С целью повышения устойчивости к действию помех предложен быстрый алгоритм поиска и обнаружения широкополосного ФМн-2 сигнала ССПИ с использованием адаптивного выбора ветви ВПР и оптимальной по критерию минимума СКО линейной фильтрации (ОЛФ), структурная схема которого представлена на рисунке 1.

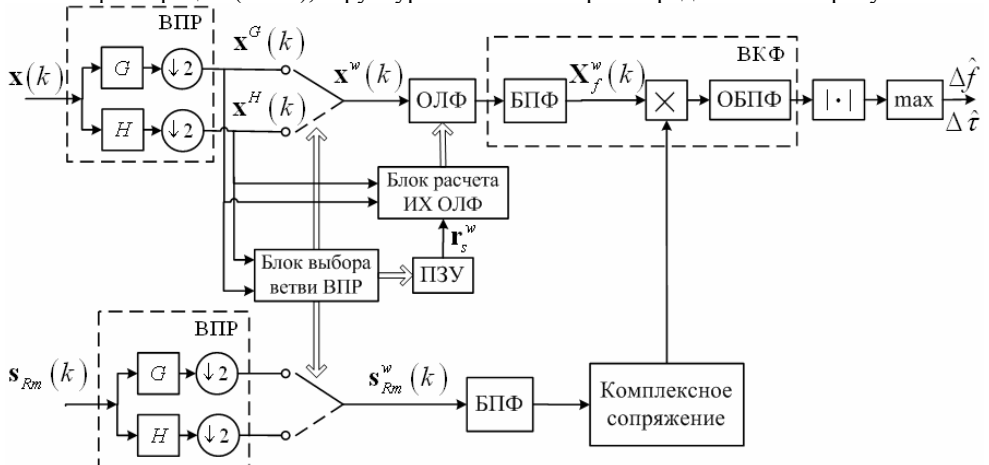


Рисунок 1

Здесь  $H$  и  $G$  - фильтры соответственно низкочастотной и высокочастотной ветвей ВПР;  $\downarrow 2$  - прореживание с коэффициентом 2; ОБПФ – обратное БПФ, ИХ – импульсная характеристика, ПЗУ – постоянное запоминающее устройство. В блоке выбора ветви ВПР производится поочередная оценка дисперсии помехи в каждой ветви ВПР, и в дальнейшем используется ветвь, в которой данная оценка минимальна. При использовании частоты дискретизации, в 4 раза превышающей промежуточную частоту сигнала, это обеспечивает выбор ветви ВПР с максимальным значением от-

ношения сигнал-помеха. Импульсная характеристика ОЛФ в случае статистической независимости шума, помехи и сигнала рассчитывается согласно выражению

$$\mathbf{h}_{\text{ОЛФ}} = (\hat{\mathbf{R}}_x^w)^{-1} \mathbf{r}_s^w, \quad (1)$$

где  $\hat{\mathbf{R}}_x^w$  - оценка корреляционной матрицы коэффициентов  $\mathbf{x}^w(k)$  выбранной ветви ВПР принятой реализации;  $\mathbf{r}_s^w$  - автокорреляционная функция (АКФ) сигнала на выходе выбранной ветви ВПР.

Использование ОЛФ увеличивает вычислительные затраты, поэтому предложен быстрый алгоритм поиска и обнаружения с адаптивным формированием опорных сигналов, структурная схема которого представлена на рисунке 2.

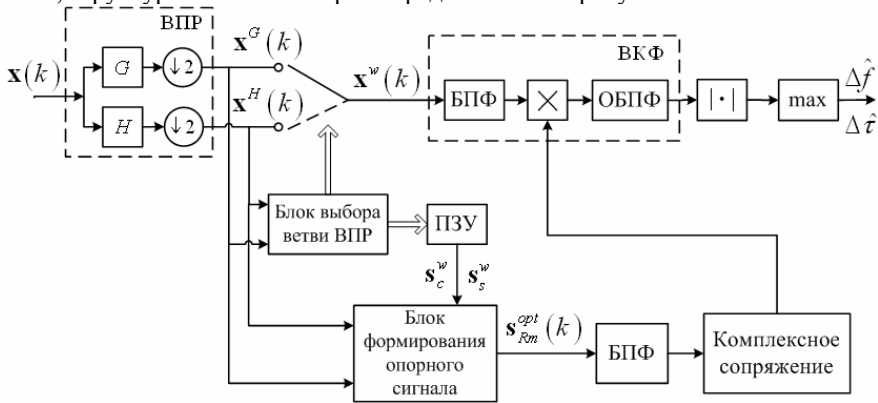


Рисунок 2

При этом действительная и мнимая части  $m$ -го опорного сигнала  $\mathbf{s}_{Rm}^{opt}(k)$  рассчитываются в соответствии с выражениями

$$\text{Re}[\mathbf{s}_{Rm}^{opt}] = (\hat{\mathbf{R}}_{nv}^w)^{-1} \mathbf{s}_c^w, \quad \text{Im}[\mathbf{s}_{Rm}^{opt}] = (\hat{\mathbf{R}}_{nv}^w)^{-1} \mathbf{s}_s^w, \quad (2)$$

где  $\mathbf{s}_c^w$ ,  $\mathbf{s}_s^w$  - квадратурные составляющие  $m$ -го сигнала на выходе выбранной ветви ВПР;  $\hat{\mathbf{R}}_{nv}^w$  - оценка корреляционной матрицы аддитивной смеси шума и помехи на выходе выбранной ветви ВПР.

Предложенный быстрый алгоритм поиска и обнаружения сигнала ССПИ с адаптивным формированием опорных сигналов обеспечивает снижение вычислительных затрат по сравнению с алгоритмом, структурная схема которого представлена на рисунке 1, на 15..50 % в зависимости от количества опорных сигналов.

С помощью имитационного моделирования проведены исследования помехоустойчивости известных и предложенных алгоритмов поиска и обнаружения сигнала при использовании ФМн-2 сигнала ССПИ «Kazsat» с расширением спектра модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью, состоящей из 1023 элементов и имеющей период 1 мс. В качестве помехи использован узкополосный гауссовский шум с гауссовской формой огибающей спектральной плотности мощности (СПМ) и эффективной шириной спектра, изменяющейся в пределах 1.5 % полосы сигнала. Получены зависимости вероятности правильного обнаружения и оценки параметров сигнала с допустимой точностью, представленные на рисунке 3. Из анализа представленных на рисунке 3 зависимостей следует, что предложенные быстрые алгоритмы поиска и обнаружения на основе ОЛФ (зависимость 3) и адаптивного формирования



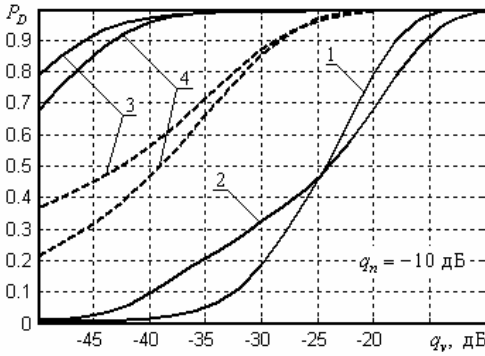


Рисунок 3

опорного сигнала (зависимость 4) обеспечивают повышение помехоустойчивости по отношению к известным алгоритмам поиска и обнаружения на основе БПФ (зависимость 1), а также на основе ВПР и БПФ (зависимость 2) примерно на 25 дБ. Пунктирными линиями на рисунке 3 представлены зависимости, полученные для предложенных алгоритмов в случае грубой аппроксимации СПМ помехи прямоугольной функцией, при этом помехоустойчивость снижается при-

лизительно на 15 дБ.

Применение предложенного быстрого алгоритма поиска и обнаружения сигнала ССПИ с адаптивным формированием опорного сигнала требует решения матричного уравнения (2) большой размерности на этапе адаптации. Поэтому в ряде случаев целесообразно использование предложенного быстрого алгоритма поиска и обнаружения на основе ОЛФ, структурная схема которого представлена на рисунке 1. В этом случае может быть предложен известный алгоритм расчета спектра  $\mathbf{X}_f^w(n)$  прошедшего фильтрацию сигнала  $\mathbf{x}^w(k)$ , в котором применяется свертка в частотной области путем поэлементного перемножения спектра  $\mathbf{X}_0^w(n)$  дополненной нулями принятой реализации на выходе выбранной ветви ВПР  $\mathbf{x}^w(k)$  и спектра  $\mathbf{H}_0(n)$  дополненной нулями ИХ ОЛФ  $\mathbf{h}_{\text{ОЛФ}}$ . При этом производится промежуточный переход во временную область для удаления избыточных отсчетов, появившихся в результате рассмотренного дополнения нулями, что увеличивает вычислительные затраты.

С целью уменьшения объема вычислительных затрат предложена модификация алгоритма расчета спектра прошедшего фильтрацию сигнала. Структурная схема модифицированной части алгоритма представлена на рисунке 4. При этом уменьшение количества отсчетов в 2 раза осуществляется в соответствии с известным выражением

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_2^w(n) &= \mathbf{X}_1^w(n) \mathbf{A}_N^*(n) + \mathbf{X}_1^{w*}(N/2 - n) \mathbf{B}_N^*(n), \\ \mathbf{A}_N(n) &= (1/2)(1 - j \exp(-j2\pi n/N)), \\ \mathbf{B}_N(n) &= (1/2)(1 + j \exp(-j2\pi n/N)), \quad n = \overline{0, N/2 - 1}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $N$  - длина реализации сигнала;  $(\cdot)^*$  - оператор комплексно сопряжения. Разделение  $\mathbf{X}_3^w(n)$  на два вектора половинной длины производится согласно выражению

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_4^w(n) &= \mathbf{X}_3^w(n), \quad n = \overline{0, N/4 - 1}, \\ \mathbf{X}_5^w(n) &= \mathbf{X}_3^w(m), \quad n = \overline{0, N/4 - 1}, \quad m = \overline{N/4, N/2 - 1}. \end{aligned} \quad (4)$$

Расчет вспомогательного вектора проводится в соответствии с выражением

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_7^w(n) &= (1/2) \left( \mathbf{X}_6^w(n) + FFT \left[ \left( \mathbf{W}(m) \cdot FFT' \left[ \mathbf{X}_5^{w*}(l) \right] \right)^* \right] \right), \\ n &= \overline{0, N/4 - 1}, \quad m = \overline{0, N/4 - 1}, \quad l = \overline{0, N/4 - 1}, \end{aligned} \quad (5)$$

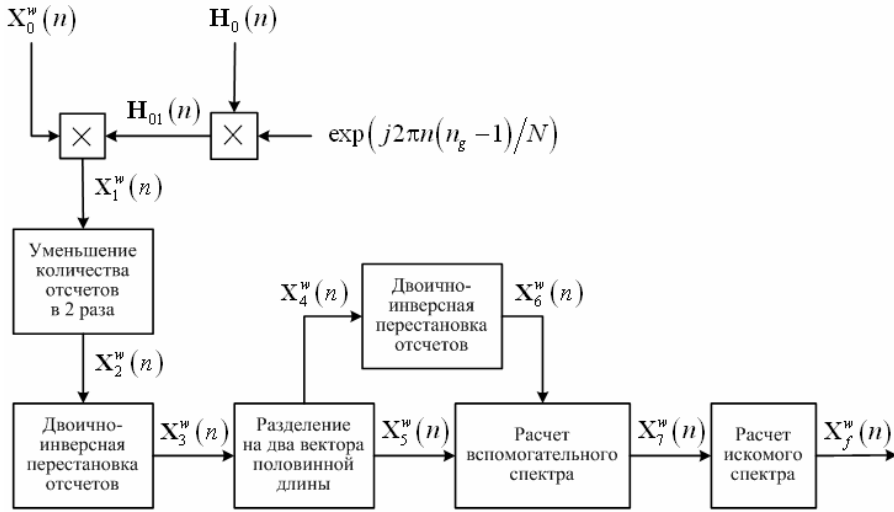


Рисунок 4

где  $\mathbf{W}(m) = \exp(-j2\pi m/(N/2))/(N/4)$ ;  $FFT[\cdot]$  - оператор БПФ, вычисляемого посредством алгоритма с прореживанием по времени, но без двоично-инверсной перестановки входной последовательности. Вычисление искомого спектра осуществляется согласно известной формуле

$$\begin{aligned}
 \mathbf{X}_f^w(0) &= \mathbf{X}_7^w(0)\mathbf{A}_{N/2}(0) + \mathbf{X}_7^{w*}(0)\mathbf{B}_{N/2}(0), \\
 \mathbf{X}_f^w(n) &= \mathbf{X}_7^w(n)\mathbf{A}_{N/2}(n) + \mathbf{X}_7^{w*}(N/4-n)\mathbf{B}_{N/2}(n), \quad n = \overline{1, N/4-1}, \\
 \mathbf{X}_f^w(N/4) &= \text{Re}[\mathbf{X}_7^w(0)] - \text{Im}[\mathbf{X}_7^w(0)], \quad \mathbf{X}_f^w(n) = \mathbf{X}_f^{w*}(N/2-n), \\
 n &= \overline{N/4+1, N/2-1}, \\
 \mathbf{A}_{N/2}(n) &= (1/2)(1 - j \exp(-j2\pi n/(N/2))), \\
 \mathbf{B}_{N/2}(n) &= (1/2)(1 + j \exp(-j2\pi n/(N/2))).
 \end{aligned} \tag{6}$$

В ряде ССПИ возникает необходимость поиска и обнаружения двух и более сигналов одновременно, при этом может быть использован известный алгоритм расчета спектров двух прошедших фильтрацию сигналов. С целью снижения вычислительных затрат предложена аналогичная представленной на рисунке 4 модификация данного алгоритма.

Установлено, что предложенные алгоритмы расчета спектров прошедших фильтрацию сигналов позволяют уменьшить количество выполняемых при фильтрации вычислительных операций на 15..19 %, а общий объем вычислительных затрат на этапе поиска и обнаружения может быть снижен до 12..14 %.

Одним из эффективных методов повышения помехоустойчивости ССПИ является использование линейного предсказания и корректирования сигнала. В работах В.К. Маригодова предложены алгоритмы расчета оптимальных амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) предсказывающего и корректирующего фильтров при условии их взаимной обратности, что существенно упрощает синтез и позволяет восстановить исходный спектр сигнала на приемной стороне. Однако использование условия взаимной обратности АЧХ приводит к тому, что при низком отношении сигнал-помеха ССПИ с линейным предсказанием и корректированием сигнала существ-

венно проигрывает в помехоустойчивости ССПИ с оптимальной линейной фильтрацией. В работах Л. Френкса предложен алгоритм расчета оптимальных АЧХ предсказывающего и корректирующего фильтров без наложения условия их взаимной обратности. При этом решается вариационная задача минимизации функционала СКО на выходе корректирующего фильтра

$$\overline{\varepsilon^2} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \left( S(\omega) (1 - |H_{pr}(j\omega)| \cdot |H_{cor}(j\omega)|)^2 + (N(\omega) + G(\omega)) |H_{cor}(j\omega)|^2 \right) d\omega \quad (7)$$

при ограничении на мощность сигнала на выходе предсказывающего фильтра

$$P_{pr} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} S(\omega) |H_{pr}(j\omega)|^2 d\omega, \quad (8)$$

где  $S(\omega)$  - СПМ сигнала;  $N(\omega)$  - СПМ БГШ;  $G(\omega)$  - СПМ помехи;  $|H_{pr}(j\omega)|$  - АЧХ предсказывающего фильтра;  $|H_{cor}(j\omega)|$  - АЧХ корректирующего фильтра;  $\omega_1, \omega_2$  - граничные частоты полосы пропускания системы.

При реализации алгоритма поиска и обнаружения на основе БПФ путем анализа ВКФ принятого и опорного сигналов осуществляется обнаружение сигнала, а также оценка его псевдозадержки. Наличие помехи с ограниченным спектром в полосе сигнала приводит к значительному искажению спектра сигнала после прохождения предсказывающего и корректирующего фильтров, вследствие чего существенно увеличивается уровень боковых лепестков ВКФ. Это приводит к снижению вероятности оценки псевдозадержки с точностью, достаточной для успешного захвата сигнала. В связи с этим предложено при решении вариационной задачи синтеза АЧХ предсказывающего и корректирующего фильтров ввести дополнительное условие

$$P_{cor} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} S(\omega) |H_{pr}(j\omega)|^2 |H_{cor}(j\omega)|^2 d\omega, \quad (9)$$

накладывающее ограничение на мощность сигнала на выходе корректирующего фильтра. Использование ограничения (9) позволяет снизить уровень боковых лепестков ВКФ и, как следствие, повысить вероятность правильного обнаружения и оценки параметров сигнала ССПИ с допустимой точностью.

На рисунке 5 представлены полученные с помощью имитационного моделиро-

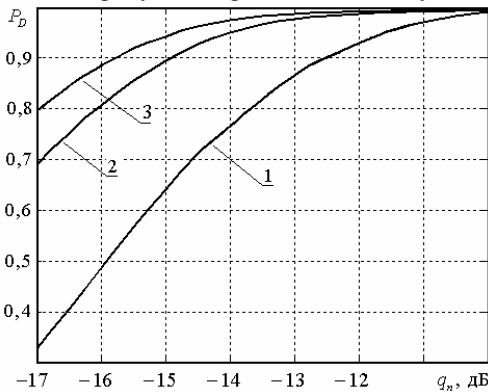


Рисунок 5

вания зависимости вероятности правильного обнаружения и оценки параметров широкополосного ФМн-2 сигнала ССПИ «Kazsat» от отношения сигнал-шум при наличии на несущей частоте сигнала помехи с эффективной шириной спектра, равной 10 % полосы сигнала, при этом отношение сигнал-помеха составляет -30 дБ. Здесь использованы следующие обозначения зависимостей: 1 – оптимальная фильтрация; 2 – предсказание и коррекция без предложенного дополнительного условия (9); 3 – предсказе-

ние и корректирование с использованием предложенного ограничения (9). Из анализа представленных зависимостей следует, что использование предложенного алгоритма поиска и обнаружения с использованием линейного предвыскажения и корректирования сигнала позволяет повысить помехоустойчивость примерно на 1 дБ. По сравнению с алгоритмом поиска и обнаружения на основе оптимальной линейной фильтрации обеспечено повышение помехоустойчивости на 3..3,5 дБ.

**Во второй главе** проведен анализ воздействия различного вида преднамеренных и непреднамеренных помех на систему слежения ССПИ, осуществлена оптимизация контура ФАПЧ по нескольким показателям качества, а также предложена процедура синтеза цифрового нерекурсивного симметричного фильтра, обеспечивающего повышение эффективности системы слежения ССПИ при действии УП.

Проанализировано влияние различного рода преднамеренных и непреднамеренных помех на цифровые системы слежения ССПИ, использующих широкополосные ФМн-2 сигналы. Показано, что степень воздействия гармонической помехи (ГП) имеет наибольшее значение при величинах частотной расстройки  $\Delta f_{ГП}$  относительно несущей сигнала, определяемых выражением

$$\Delta f_{ГП} = b / (2T_{ПСП}), \quad (10)$$

где  $b$  - целое нечетное число;  $T_{ПСП}$  - период ПСП сигнала. Установлено, что наличие ГП, способной нарушить функционирование системы слежения ССПИ, использующей широкополосный ФМн-2 сигнал, может быть легко обнаружено путем анализа спектра принятой реализации. При этом появляется возможность применения режекции и восстановления работоспособности ССПИ в условиях действия мощной ГП.

Показано, что оптимальная с точки зрения энергетике станции постановки помех скорость изменения частоты уводящих по частоте ретранслированной (РП) и имитационной (ИП) помех должна быть на 1..2 порядка выше, чем максимальная скорость изменения доплеровского сдвига частоты сигнала в средне- и низкоорбитальных ССПИ. Это позволяет предложить в качестве меры борьбы с данными видами помех фиксацию значения средней частоты в контуре ФАПЧ, если скорость изменения данной частоты превышает некоторое пороговое значение.

Показано, что мощность передатчика ИП при равной степени воздействия на систему слежения ССПИ может быть на 10..20 дБ ниже, чем мощность передатчика РП. В то же время установлено, что, в отличие от ИП, использование РП не требует наличия априорной информации о периоде ПСП подавляемой ССПИ, оценка которого может быть успешно проведена с помощью автокорреляционной обработки сигнала ССПИ.

В системах слежения ССПИ, использующих ФМн-2 сигнал с расширением спектра модуляцией несущей ПСП, часто применяется контур ФАПЧ с астатизмом 2-го порядка в виде петли Костаса, который, в отличие от контура ФАПЧ с астатизмом 3-го порядка, всегда устойчив и более прост в анализе. При этом наиболее важными показателями качества являются флуктуационная ошибка, динамическая ошибка, а также время установления режима синхронизма. Дисперсия флуктуационной ошибки в контуре ФАПЧ с астатизмом 2-го порядка в виде петли Костаса определяется выражением

$$\sigma_{\varphi}^2 = \frac{1}{8\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{K_L^2 (1 + \omega^2 \alpha_2^2) S_n(\omega)}{(K_L A_s^2 - \omega^2 \alpha_1)^2 + (\omega K_L A_s^2 \alpha_2)^2} d\omega, \quad (11)$$

где  $K_L$  - коэффициент усиления петли;  $A_s$  - амплитуда сигнала;  $\alpha_1, \alpha_2$  - коэффициенты петлевого фильтра;  $S_n(\omega)$  - СПМ эквивалентного фазового шума. Значение установившейся динамической ошибки вследствие изменения доплеровского сдвига частоты сигнала определяется выражением

$$\varphi_s = \omega'_D \alpha_1 / (K_L A_s^2), \quad (12)$$

где  $\omega'_D$  - скорость линейного изменения доплеровского сдвига частоты. Время установления режима синхронизма может быть оценено выражением

$$t_s \approx 16\alpha_1 / \left( K_L \alpha_2 \left( 1 + \alpha_1 / (K_L \alpha_2^2) \right) \right). \quad (13)$$

Показатели качества (11)..(13) должны рассматриваться в комплексе, поэтому предложен комбинированный критерий оптимальности

$$k_{r, \min} = \min_{\alpha_1, \alpha_2} \left[ \beta \delta_{\Sigma \text{ норм}}(\alpha_1, \alpha_2) + (1 - \beta) t_{s \text{ норм}}(\alpha_1, \alpha_2) \right], \quad (14)$$

где  $\beta = \overline{0,1}$  - весовой множитель;  $\delta_{\Sigma \text{ норм}} = \delta_{\Sigma} / \delta_{\Sigma \text{ max}}$  - нормированный показатель качества;  $\delta_{\Sigma} = \sigma_{\varphi} + \varphi_s$ ;  $t_{s \text{ норм}} = t_s / t_{s \text{ max}}$  - нормированное время установления режима синхронизма;  $\delta_{\Sigma \text{ max}}, t_{s \text{ max}}$  - максимально допустимые значения показателей качества.

Ряд современных и перспективных ССПИ функционируют в условиях априорной неопределенности относительно отношения сигнал-шум на входе приемника. Поэтому представляет интерес повышение робастности ССПИ к изменению отношения сигнал-шум. Показано, что в случае  $\beta = 0,5$  использование коэффициентов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  петлевого фильтра контура ФАПЧ, оптимальных для отношения сигнал-шум, равного -25 дБ, обеспечивает наименьшее среднее значение результирующего показателя качества (14) при изменении величины отношения сигнал-шум в пределах от -30 дБ до -10 дБ.

Одним из часто используемых методов повышения устойчивости систем слежения ССПИ к действию УП является применение фильтрации сигнала перед подачей его на контуры слежения. С целью снижения вычислительных затрат, а также уменьшения ошибки слежения предложена процедура синтеза цифрового нерекурсивного симметричного оптимального по критерию минимума СКО линейного фильтра:

1 Производится расчет квазисимметричной ИХ

$$\mathbf{h}_{\text{ОлФ}} = (\mathbf{R}_s + \mathbf{R}_n)^{-1} \mathbf{r}'_s, \quad \text{где } \mathbf{r}'_s(k) = \mathbf{r}_s(k - M_{\text{ОлФ}}/2), \quad k = \overline{0, M_{\text{ОлФ}} - 1}, \quad (15)$$

где  $\mathbf{r}_s(k)$  - АКФ сигнала;  $M_{\text{ОлФ}}$  - порядок нерекурсивного фильтра;  $\mathbf{R}_s$  и  $\mathbf{R}_n$  - корреляционные матрицы статистически независимых сигнала и помехи соответственно.

2 Замена квазисимметричной ИХ на симметричную

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_{\text{ОлФ}}^c(k) &= \mathbf{h}_{\text{ОлФ}}(k), \quad k = \overline{0, M_{\text{ОлФ}}/2}, \\ \mathbf{h}_{\text{ОлФ}}^c(k) &= \mathbf{h}_{\text{ОлФ}}(M_{\text{ОлФ}} - k), \quad k = \overline{M_{\text{ОлФ}}/2 + 1, M_{\text{ОлФ}}}. \end{aligned} \quad (16)$$

3 Для различных значений коэффициента  $\Psi$  проводится дополнительная многомерная оптимизация  $\mathbf{h}_{\text{ОлФ}}^c(k)$ , при этом целевая функция на  $i$ -й итерации имеет вид

$$I = -2\mathbf{r}_s^T \mathbf{h}_i + \mathbf{h}_i^T (\mathbf{R}_s + \mathbf{R}_n) \mathbf{h}_i + \Psi / (\mathbf{h}_i^T (\mathbf{R}_s + \mathbf{R}_n) \mathbf{h}_i), \quad (17)$$

где  $\mathbf{h}_i$  - ИХ фильтра на  $i$ -й итерации. При этом с целью сохранения симметрии ИХ на каждом шаге оптимизации осуществляется симметрирование согласно выражению

$$\mathbf{h}_{i+1}(k) = \mathbf{h}_i(M_{\text{ОлФ}} - k), \quad k = \overline{0, M_{\text{ОлФ}}/2 - 1}, \quad (18)$$

$$\mathbf{h}_{i+1}(k) = \mathbf{h}_i(k), \quad k = \overline{M_{\text{ОлФ}}/2, M_{\text{ОлФ}}}.$$

В результате дополнительной оптимизации для каждого значения коэффициента  $\Psi$  получена симметричная импульсная характеристика  $\mathbf{h}_{\text{ОлФ}}^{c\text{омм}}(k, \Psi)$ .

4 В качестве импульсной характеристики оптимального фильтра среди всех векторов отсчетов  $\mathbf{h}_{\text{ОлФ}}^{c\text{омм}}(k, \Psi)$  выбирается тот, который обеспечивает наименьшее значение СКО.

Показано, что использование симметричной ИХ фильтра позволяет сократить количество вычислительных операций при реализации фильтрации приблизительно на 25 %, а общий объем вычислительных затрат на этапе слежения уменьшается на 7..22 % в зависимости от порядка фильтра.

В качестве примера на рисунке 6 представлены полученные с помощью имитационного моделирования зависимости среднеквадратического отклонения фазовой ошибки в контуре ФАПЧ системы слежения ССПИ от порядка цифрового нерекурсивного фильтра, при этом в качестве УП использован узкополосный гауссовский шум с прямоугольной формой огибающей СПМ и шириной полосы, составляющей 1,5 % полосы сигнала при отношении сигнал-шум, равном -5 дБ, и отношении сигнал-

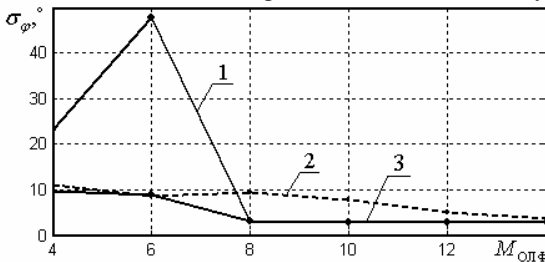


Рисунок 6

3 – симметричный фильтр, синтезированный в соответствии с предложенной процедурой с использованием дополнительной оптимизации.

Как следует из анализа представленных на рисунке 6 зависимостей, при малых значениях порядка фильтра использование синтезированной согласно предложенной процедуре ИХ позволяет до 2.3 раз снизить величину ошибки слежения в контуре ФАПЧ. При значениях порядка фильтра от 16 и выше величины среднеквадратического отклонения фазовой ошибки для симметричного и несимметричного фильтров практически равны.

**В третьей главе** рассмотрены аспекты практической реализации предложенных алгоритмов поиска, обнаружения и слежения, а также разработан алгоритм поиска и обнаружения широкополосного ФМн-2 сигнала ССПИ при низком отношении сигнал-шум, обеспечивающий снижение объема памяти приемника.

С помощью имитационного моделирования проведены исследования влияния разрядности аналого-цифрового преобразователя (АЦП) на эффективность быстрых алгоритмов поиска и обнаружения, а также алгоритмов слежения за параметрами сиг-

нала ССПИ. Показано, что при использовании АЦП со значениями разрядности от 8 до 16 бит, наиболее часто применяемыми в современной аппаратуре, характеристики предложенных алгоритмов обработки сигнала ССПИ не ухудшаются по сравнению с отсутствием квантования входной реализации.

Установлено, что использование формата представления чисел с фиксированной запятой при программной реализации контуров слежения приемника ССПИ приводит к срыву слежения. Поэтому при аппаратно-программной реализации алгоритма слежения ССПИ целесообразно использовать цифровые сигнальные процессоры (ЦСП), обеспечивающие обработку данных с плавающей запятой. Показано, что программная реализация нерекурсивной фильтрации для борьбы с УП в алгоритме слежения возможна при использовании формата представления чисел с фиксированной запятой, причем применение разрядности данных от 8 бит и выше не приводит к ухудшению характеристик по сравнению с использованием формата двойной точности с плавающей запятой.

В настоящее время все чаще применяется прямой цифровой синтез сигнала, при этом появляется возможность реализации адаптивного линейного предсказания и корректирования в цифровом виде. С помощью имитационного моделирования проведены исследования влияния порядка цифрового корректирующего фильтра на эффективность алгоритма слежения в условиях действия помех с ограниченным спектром. Показано, что значительное ухудшение характеристик ССПИ наблюдается при значениях порядка цифрового нерекурсивного корректирующего фильтра от 100..150 и ниже.

В ряде современных и перспективных ССПИ возникает необходимость осуществления поиска и обнаружения сигнала при низком отношении сигнал-шум. При этом может быть использован известный алгоритм поиска и обнаружения на основе БПФ с накоплением взятых по модулю ВКФ. С целью уменьшения объема памяти, требуемого для накопления ВКФ, предложен двухпороговый алгоритм поиска и обнаружения широкополосного ФМн-2 сигнала ССПИ, структурная схема которого представлена на рисунке 7. При этом первый порог  $z1$  используется для отбрасывания

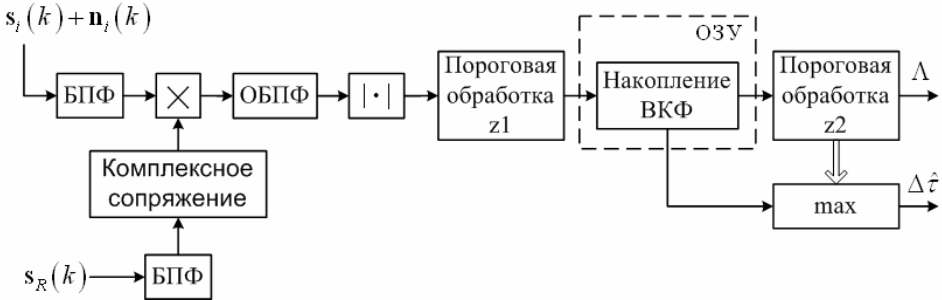


Рисунок 7

отсчетов полученной на очередной итерации накопления ВКФ аддитивной смеси сигнала с шумом  $s_i(k) + n_i(k)$  и опорного сигнала  $s_R(k)$ , а второй порог  $z2$  - для обнаружения сигнала. Показано, что при отношении сигнал-шум, равном -27,5 дБ, предложенный алгоритм поиска и обнаружения позволяет сократить объем памяти до 25..50 %, при этом снижение вероятности правильного обнаружения и оценки параметров сигнала с допустимой точностью составляет не более 1..2 %.

Проведен анализ основных параметров ЦСП ведущих мировых производителей. Показано, что существующие ЦСП с производительностью до 1800..3600 миллионов

операций с плавающей запятой в секунду и объемом памяти до 3 Мбайт позволяют осуществить реализацию в режиме реального времени быстрых алгоритмов поиска и обнаружения – при длине реализации до  $2^{14}..2^{16}$  отсчетов и алгоритма слежения с нерекурсивной фильтрацией – при частоте дискретизации сигнала до 20..50 МГц.

**В заключении** приведены основные научные и практические результаты диссертационной работы:

1 Разработан алгоритм поиска и обнаружения ФМн-2 сигнала ССПИ на основе ВПР и БПФ с адаптивным к действию УП формированием опорных сигналов, позволяющий снизить вычислительные затраты на 15..50 % по сравнению с алгоритмом, использующим оптимальную линейную фильтрацию.

2 Произведена модификация алгоритма фильтрации в частотной области для алгоритма поиска и обнаружения ФМн-2 сигнала ССПИ на основе ВПР и БПФ, позволяющая на 15..19 % снизить объем вычислительных затрат без ухудшения других характеристик алгоритма поиска и обнаружения.

3 Предложен алгоритм поиска и обнаружения сигнала ССПИ на основе БПФ с использованием адаптивного линейного предсказания и корректирования, обеспечивающий в условиях действия помех с ограниченным спектром повышение устойчивости к действию БГШ до 3..3,5 дБ по сравнению с алгоритмом поиска и обнаружения с оптимальной линейной фильтрацией.

4 Проведен анализ эффективности воздействия на систему слежения ССПИ гармонической, ретранслированной и имитационной помех, определены их оптимальные параметры. Показано, что мощность передатчика ИП может быть на 10..20 дБ ниже, чем мощность передатчика РП. Предложен ряд мер по борьбе с рассмотренными видами помех в приемнике ССПИ.

5 Обоснован критерий оптимальности при синтезе петлевого фильтра контура ФАПЧ с астатизмом 2-го порядка системы слежения ССПИ, включающий несколько показателей качества. Обеспечена робастность системы слежения ССПИ к изменению отношения сигнал-шум от -30 дБ до -10 дБ.

6 Разработана процедура синтеза оптимального по критерию минимума СКО линейного фильтра с симметричной импульсной характеристикой, обеспечивающего выигрыш на 7..22 % по количеству вычислительных операций при программной реализации алгоритма слежения в приемнике ССПИ в условиях воздействия УП, а также снижение среднеквадратического отклонения фазовой ошибки в контуре ФАПЧ до 2..3 раз при низком порядке фильтра.

7 Проведены исследования влияния разрядности АЦП и формата представления чисел на эффективность программной реализации предложенных алгоритмов поиска, обнаружения и слежения за параметрами сигнала ССПИ. Показано, что для обеспечения наилучших характеристик алгоритмов поиска, обнаружения и слежения необходимо использовать АЦП с разрядностью 8 бит и выше. Установлено, что программная реализация контуров слежения ССПИ возможна только в случае использования формата представления чисел с плавающей запятой.

8 Предложен алгоритм поиска и обнаружения ФМн-2 сигнала ССПИ при низком отношении сигнал-шум на основе суммирования ВКФ, обеспечивающий снижение объема памяти, необходимого для хранения отсчетов ВКФ, до 1,7..2 раз при уменьшении вероятности правильного обнаружения и оценки параметров сигнала с допустимой точностью не более чем на 1..2 %.

9 Проведен анализ влияния величины порядка цифрового нерекурсивного корректирующего фильтра ССПИ на эффективность алгоритма слежения при использо-



вании линейного предсказания и корректирования сигнала. Показано, что при использовании корректирующего фильтра порядка 50 и менее среднеквадратическое отклонение фазовой ошибки в контуре ФАПЧ увеличивается в 1,5..2 раза и более по сравнению с применением фильтра порядка 300 и выше.

10 Проведен анализ производительности и объема памяти современных ЦСП. Установлено, что существующие ЦСП с производительностью 1800..3600 MFLOPS и объемом встроенной оперативной памяти до 3 Мбайт позволяют осуществлять реализацию предложенных алгоритмов поиска, обнаружения и слежения за параметрами сигнала ССПИ в режиме реального времени.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Бахурин С.А., Слесарев А.С. Исследование алгоритмов обнаружения и слежения в программно реализованном приемнике спутниковых навигационных радиосигналов // Тезисы докладов 13-й Международной научно-технической конференции «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань, РГРТА, 2004. С. 33-34.

2 Кириллов С.Н., Бахурин С.А., Слесарев А.С. Быстрые алгоритмы поиска и слежения за спутниковыми навигационными радиосигналами в программно реализованном приемнике // Доклады 7-й международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение» Москва, 2005. Т.1. С. 271-274.

3 Бахурин С.А., Слесарев А.С. Быстрые алгоритмы корреляционной обработки сигналов спутниковых систем передачи информации // Тезисы доклада всероссийского научно-практического семинара «Сети и системы связи», Рязань, 2005. С. 278-279.

4 Бахурин С.А., Слесарев А.С. Быстрые алгоритмы поиска спутниковых навигационных радиосигналов в приемеиндикаторе с программной корреляционной обработкой // X Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов НИТ-2005. Рязань: РГРТА, 2005. С. 32-33.

5 Круглов А.В., Кириллов С.Н., Бахурин С.А. Слесарев А.С., Ватутин В.М. Быстрые алгоритмы обработки фазоманипулированных сигналов в системах передачи информации радиолиний управления и телеметрии космических аппаратов // Электромагнитные волны и электронные системы. № 10, 2005. С. 57-64.

6 Кириллов С.Н., Слесарев А.С. Быстрый алгоритм поиска и обнаружения сложных фазоманипулированных сигналов спутниковых систем передачи информации // Тезисы докладов 14-й Международной научно-технической конференции «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань, РГРТА, 2005. С. 63-64.

7 Слесарев А.С. Быстрый алгоритм поиска сложных фазоманипулированных спутниковых сигналов с элементами адаптации // Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании: материалы XI Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязань: РГРТУ, 2006. С. 53-54.

8 Слесарев А.С. Алгоритм корреляционной обработки сигналов спутниковых систем передачи информации на основе некогерентного накопления // Информационные технологии, сети, системы связи и телекоммуникации: материалы 31-й межвузовской научно-практической конференции. Рязань: РВВКУС, 2006. С. 156.

9 Кириллов С.Н., Слесарев А.С. Анализ устойчивости систем синхронизации космических радиолиний передачи информации к действию помех // Доклады 9-й

международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение» Москва, 2007. Т.1. С. 239-241.

10 Слесарев А.С. Устойчивость контуров ФАПЧ систем синхронизации космических радиолиний передачи информации к действию мешающих факторов и помех // XII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов НИТ-2007. Рязань: РГРТА, 2007. С. 136.

11 Кириллов С.Н., Слесарев А.С. Алгоритм обнаружения сложных фазоманипулированных сигналов спутниковых систем передачи информации при низком отношении сигнал-шум // Вестник РГРТА. Выпуск 20. Рязань, 2007. С. 41-44.

12 Кириллов С.Н., Слесарев А.С. Двухпороговый алгоритм обнаружения сложных фазоманипулированных сигналов при низком отношении сигнал-шум // Научная сессия МИФИ-2007. Сборник научных трудов. В 17 томах. Т.2. Технологии разработки программных систем. Информационные технологии. М.: МИФИ, 2007. С. 145-146.

13 Кириллов С.Н., Слесарев А.С., Цыплаков А.А. Повышение устойчивости системы фазовой синхронизации спутниковых радионавигационных систем к воздействию мешающих факторов // 5-я международная научно-техническая конференция "К.Э. Циолковский - 150 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика". Рязань: РГРТУ, 2007. С. 169-171.

14 Кириллов С.Н., Бахурин С.А., Слесарев А.С. и др. Цифровая обработка сигналов помехоустойчивых космических радиолиний. Модели, алгоритмы и технические средства: / Под ред. В.М. Ватутина. – М.: Радиотехника, 2007. – 96 с.

15 Ватутин В.М., Леонов М.С., Круглов А.В., Кириллов С.Н., Бахурин С.А., Слесарев А.С., Смирнов С.В. Модели и быстрые алгоритмы корреляционной обработки сигналов радиолиний передачи информационно-управляющих потоков // Информационно-измерительные и управляющие системы, №7, т.5, 2007 г. С. 41-43.

16 Слесарев А.С. Оптимизация передаточной функции петлевого фильтра контура ФАПЧ с астатизмом второго порядка систем синхронизации спутниковых командно-программных радиолиний // Вестник РГРТУ. Выпуск 22. Рязань, 2007. С. 115-118.

17 Слесарев А.С. Оптимизация передаточной функции контура ФАПЧ системы синхронизации космической радиолинии передачи информации // Тезисы докладов 15-й Международной научно-технической конференции «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань, РГРТА, 2008. С. 65-66.

18 Кириллов С.Н., Слесарев А.С. Модификация алгоритма цифровой фильтрации фазоманипулированного сигнала блока поиска и обнаружения спутниковой радиотехнической системы передачи информации // Вестник РГРТУ. № 4 (выпуск 26). Рязань, 2008. С. 28-32.

19 Кириллов С.Н., Слесарев А.С. Быстрый алгоритм поиска и обнаружения фазоманипулированного сигнала спутниковой системы передачи информации, адаптивный к действию узкополосных помех // Вестник РГРТУ. № 1 (выпуск 27). Рязань, 2009. С. 3-7.

Слесарев Алексей Сергеевич

Эффективные алгоритмы обработки  
фазоманипулированных сигналов в устройствах поиска, обнаружения  
и слежения спутниковых систем передачи информации  
при действии мешающих факторов

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 6.05.2009.  
Формат бумаги 60x84 1/16.  
Условных печатных листов 1,1.  
Тираж 100 экз. Заказ № 34.

Участок оперативной полиграфии ГНУ ВНИМС,  
390025, Рязань, ул. Щорса, д. 38/11.