На правах рукописи

НА ПРАВАХ РУКОПИСИ НЕ ВОСПРОИЗВОДЯТСЯ

УДК 621.393.266

ШУВАЛОВ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ

Синтез и анализ алгоритмов первичной обработки сигналов GPS/ГЛОНАСС в навигационных комплексах при воздействии структурно-детерминированных помех

Специальность 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2006

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом Университете им. Н.Э. Баумана и ФГУП "Научно-исследовательский институт Космического Приборостроения"

Научный руководитель доктор технических наук,
профессор Власов И.Б.

Официальные оппоненты доктор технических наук,
профессор Перов А.И.
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Бакитько Р.В.

Ведущая - Исследовательский
ный Институт МО РФ

У1758023
Шувалов А.В.
Синтез и анализ алгоритмов первичной обработки сигналов GPS/ГЛОНАСС в навигационных комплексах...
0-00
2006
У 1758023

Защита ... 2006 г. в 12 час.
на заседани... та Д 212.141.11 в
Московском ... м Университете им. Н.Э.
Баумана.

МГТУ им.

МГТУ им.

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

Власов И.Б.

Общая характеристика работы.

Актуальность темы. Для современного этапа развития аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем (СРНС) характерен резкий рост требований к ее пользовательским характеристикам. Удовлетворение этих требований, только за счет усложнения обработки сигналов в самой навигационной аппаратуре, не всегда возможно. Более перспективной считается интеграция радионавигационной аппаратуры с другими датчиками и системами в составе навигационных комплексов.

Примерами таких навигационных комплексов, получивших название "функциональных дополнений СРНС", являются сети псевдоспутников, а также навигационные комплексы, основанные на принципе ретрансляции навигационных сигналов. Под термином "псевдоспутник" в настоящее время понимается комплекс радиотехнических устройств, расположенный в реперной точке земной поверхности и выполняющий следующие основные функции: формирование корректирующей информации и излучение сигнала, модулированного указанной информацией, а также дальномерным кодом. Сигнал псевдоспутника используется в навигационной аппаратуре при решении навигационной задачи наравне с сигналами обычных спутников.

Известны предложения по использованию сетей псевдоспутников для обеспечения автоматической посадки самолетов, прецизионной навигации в городах с плотной застройкой, внутри помещений и в других местах, где затруднен прием сигналов навигационных спутников; для создания систем управления самоходными устройствами, используемыми при горных работах, централизованный контроль за передвижением различных объектов (специализированных автомашин, танков и солдат на поле боя) и др.

Другим примером перспективных навигационных комплексов являются системы с использованием ретрансляции сигналов навигационных спутников. Известны предложения по использованию таких систем для осуществления внешнетраекторных измерений (ВТИ) в процессе испытаний изделий авиационной и ракетно-космической техники. Спецификой задач, решаемых системами ВТИ с помощью ретрансляторов, являются необходимость достижения высокого темпа навигационно-временных определений (более 100 Гц), малого времени поиска сигналов (менее 2 сек), быстрого перезахвата рабочего созвездия. Выполнение таких требований путем размещения на борту объекта соответствующей радионавигационной аппаратуры не всегда оправдано как с технической, так и с экономической точки зрения.

Другой вариант практического применения принципа ретрансляции сигна- НС основан на том, что ретранслятор, координаты которого известны с вы- точностью, может выполнять функции псевдоспутника. Сеть таких ретранс- в позволяет дополнять в локальной зоне орбитальную группировку навига- ых спутников, а также позволяет рассчитывать поправки дифференциальной кции непосредственно в навигационной аппаратуре пользователя.

В обоих рассмотренных вариантах ретранслятор осуществляет прием, уси- , гетеродинирование и переизлучение навигационных сигналов, которые за- принимаются потребителем.

1758023
Шувалов А. В. Синтез и анал

М Г Т У
им. Н. Э. Баумана
Б Л И О Т Е К А

В описанных примерах перспективных функциональных дополнений наряду с основными сигналами навигационных спутников используются также вспомогательные внутрисистемные сигналы. В сети псевдоспутников это сигналы псевдоспутников, модулированные служебной информацией и дальномерным кодом; в системе с использованием ретранслятора – это т.н. пилот-сигнал, добавляемый к излучаемым сигналам и предназначенный для ускорения начального поиска сигналов и ряда других функций.

С целью упрощения высокочастотного тракта приемной аппаратуре вспомогательные сигналы излучаются, как правило, в том же частотном диапазоне, что и основные сигналы спутников. При этом из-за большой разности расстояний "приемная аппаратура – навигационный спутник" и "приемная аппаратура – передатчик вспомогательного сигнала" мощность последнего в точке приема существенно (на 30-50дБ) превышает мощность сигналов спутников. Такой сильный сигнал создает внутрисистемную помеху навигационному приемнику вплоть до нарушения работоспособности.

Характерной особенностью данной помехи является то, что на приемной стороне известна структура помехового сигнала (вид и параметры модулирующего сигнала, частота и т.д.). Такой вид помехи получил название структурно-детерминированной.

Для ослабления действия внутрисистемной помехи на этапе проектирования функционального дополнения принимаются меры по обеспечению электромагнитной совместимости: частотное и поляризационное разделение, импульсный режим излучения, ограничение зоны действия и др. Однако зачастую указанные меры не в состоянии обеспечить необходимую помехозащиту, что определяет актуальность задачи повышения помехоустойчивости алгоритмов обработки сигнала в навигационной аппаратуры, работающей в составе комплекса.

Анализ помехоустойчивости навигационного приемника, построенного с использованием традиционных алгоритмов, выявляет недостаточность его помехозащиты для использования в составе рассматриваемых комплексов. Известны несколько методов повышения помехозащищенности навигационной аппаратуры. К ним относятся.

- Использование более узкополосных следящих систем, работающих с поддержкой от вспомогательных датчиков. Наибольшее повышение помехозащищенности обеспечивают алгоритмы комплексирования навигационной аппаратуры с блоком инерциальной навигации (10-15 дБ).
- Использование алгоритмов многопользовательского детектирования, разработанных для систем сотовой связи с кодовым разделением каналов. Характерной особенностью таких алгоритмов является то, что они получены применительно к задаче демодуляции символов передаваемой информации. При этом задача оценивания параметров сигнала, имеющая основное значение для навигационного приемника, остается не решенной.
- Использование адаптивной фильтрации сигнала перед корреляционной обработкой внутри приемника. Использование режекторного фильтра, настраиваемого на частоту помехи, обеспечивает работоспособность навигационной аппаратуры при отношениях помеха/сигнал более 60дБ. Однако эффективность этих алгоритмов существенно зависит от ширины полосы помехи. В рассматривае-

мой задаче спектр помехи, как правило, перекрывает спектр сигнала, что делает применение алгоритмов данной группы неэффективным.

- Использование алгоритмов компенсации помехи. Алгоритмы данной группы обеспечивают примерно такую же помехозащиту, как и режекторный фильтр, кроме того, их эффективность не зависит от ширины полосы помехи. Сложность, возникающая при их использовании, заключается в необходимости учета информационной модуляции, присутствующей не только в навигационном, но и в помеховом сигнале. Описанные в литературе алгоритмы эту особенность не учитывают.

Проведенный обзор порождает интерес к синтезу алгоритмов, оптимальных применительно к рассматриваемой задаче, а также к анализу потенциальных характеристик помехоподавления. Это определяет актуальность проводимых в диссертации исследований и практическую ценность полученных в ней результатов.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является повышение помехозащищенности навигационной аппаратуры GPS/ГЛОНАСС, работающей в составе комплекса при наличии внутрисистемных структурно-детерминированных помех. При этом вниманис уделяется синтезу оптимальных алгоритмов первичной обработки навигационных сигналов в приемной аппаратуре, а также анализу точностных характеристик синтезированных алгоритмов.

При этом радиочастотный тракт считается линейным, поэтому в диссертационной работе не рассматриваются искажение сигнала при прохождении сигнала и помехи через радиочастотный тракт, а так же вопросы построения линейного радиочастотного тракта с большим динамическим диапазоном. Также не рассматриваются алгоритмы помехозащиты, основанные на адаптации диаграммы направленности антенны.

В работе решены следующие основные задачи.

1. Проведен анализ существующих методов повышения помехозащиты навигационной аппаратуры.
2. Выполнен статистический синтез оптимальных алгоритмов фильтрации информативных параметров навигационного сигнала при воздействии структурно-детерминированной помехи для трех практически важных случаев:
   - сигнал и помеха не имеют информационной модуляции;
   - информационная модуляция присутствует только в сигнале;
   - как сигнал, так и помеха несут информационную модуляцию;
3. Предложены упрощения синтезированных оптимальных алгоритмов оценивания для частных случаев мощной помехи, а также слабой корреляция сигнала и помехи.
4. Разработаны структурные схемы устройств, реализующих полученные алгоритмы первичной обработки сигналов GPS/ГЛОНАСС в навигационной аппаратуре.
5. Проведен анализ потенциальных характеристик точности и помехоустойчивости, обеспечиваемых синтезированными оптимальными алгоритмами в зависимости от мощности и других параметров помехи.
6. Разработано программное обеспечения, позволяющее провести имитационное моделирование первичной обработки навигационного сигнала GPS/ГЛОНАСС при действии внутрисистемной структурно-детерминированной помехи.
7. Проведено имитационное моделирование с целью исследования эффективности

синтезированных алгоритмов в режимах захвата и слежения.

Методы исследований. При решении поставленных задач в работе использован аппарат математического анализа, статистической радиотехники, теории вероятностей и случайных процессов, статистического моделирования, вычислительной математики и программирования. Программная реализация разработанных оптимальных алгоритмов первичной обработки навигационных сигналов выполнена в среде программирования MatLAB 6.0.

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

- оптимальные алгоритмы приема сигналов GPS/ГЛОНАСС при наличии в канале структурно-детерминированной помехи, учитывающие полный вектор параметров состояния помехи (когерентные алгоритмы);
- оптимальные алгоритмы приема сигналов GPS/ГЛОНАСС при наличии в канале структурно-детерминированной помехи, учитывающие неполный вектор параметров состояния помехи (алгоритмы, некогерентные по помехе);
- квазиоптимальные алгоритмы приема навигационных сигналов, полученные из оптимальных для случая большого отношения помеха/сигнал, а также случая слабой корреляции сигнала и помехи;
- результаты исследований теоретических зависимостей точности оценивания радионавигационных параметров сигнала от различных параметров помехи, полученные при помощи решения матричных дисперсионных уравнений;
- результаты имитационного моделирования работы навигационного приемника с использованием полученных алгоритмов при воздействии внутрисистемной структурно-детерминированной помехи.

Практическая ценность работы.

Разработаны оптимальные алгоритмы фильтрации информативных параметров навигационного сигнала при действии структурно-детерминированной помехи.

Получены теоретические зависимости точности оценивания параметров навигационного сигнала от различных параметров помехи.

Разработаны структурные схемы устройств, реализующих оптимальную и квазиоптимальную обработку навигационных сигналов при наличии внутрисистемной структурно-детерминированной помехи.

Разработано программное обеспечение, позволяющее провести имитационное моделирование работы навигационного приемника в режимах захвата и слежения при воздействии структурно-детерминированной помехи, а также исследовать эффективность синтезированных алгоритмов первичной обработки.

Реализация и внедрение результатов исследования. Результаты исследования и разработанное программное обеспечение использованы при выполнении НИР и ОКР, выполненных во ФГУП НИИ Космического Приборостроения в 2001-2006 годах, что подтверждено соответствующими документами.

Апробация результатов. Основные результаты доложены и обсуждены на следующих конференциях: международный форум информатизации МФИ-2000 "Телекоммуникационные и вычислительные системы" (Москва, 2000г.), научно-техническая конференция МНТО РЭС им А.С.Попова "Проблемы эффективности управления и связи РВСН и применение космических систем военного назначения" (Москва, 2002г.).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, двух приложений и списка литературы. Работа изложена на 173 страницах машинописного текста, содержит 46 рисунков, 2 таблицы и список литературы из 65 названий.

Основное содержание работы.

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы и решаемых в диссертационной работе задач, формулируется цель и направление исследований, определяется подход к решению рассматриваемой задачи повышения помехозащищенности алгоритмов первичной обработки навигационных сигналов, аргументируется научная новизна и ценность результатов.

В первой главе рассматриваются внутрисистемные помехи в навигационных комплексах, приводятся данные по типовым отношениям помеха/сигнал, ширине спектра и структуре сигнала внутрисистемной помехи. Проводится анализ влияния различных помех на навигационную аппаратуру пользователя, в результате чего обосновывается необходимость применения специальных алгоритмов помехоподавления в аппаратуре, работающей в составе рассматриваемых комплексов. Отмечается, что наименьшей помехоустойчивостью, ограничивающей помехозащищенность навигационной аппаратуры в целом, обладает система фазовой автоподстройки частоты.

Производится обзор известных вариантов построения первичной обработки навигационных сигналов, обеспечивающих повышенную помехозащищенность. При этом рассматриваются следующие варианты:

- использование следящих систем с минимальными шумовыми полосами, что достигается работой следящих систем с поддержкой от вспомогательных датчиков;
- использование опорных сигналов с модифицированными псевдослучайными последовательностями;
- использование алгоритмов многопользовательского детектирования, предлагавшихся ранее для систем сотовой связи с кодовым разделением каналов;
- использование алгоритмов адаптивной фильтрации;
- использование алгоритмов компенсации помех.

Отмечается, что наибольшей помехоустойчивостью обладают алгоритмы адаптивной фильтрации сигнала и алгоритмы компенсации помех (допустимое отношение помеха/сигнал 60-70дБ). Анализируются положительные и отрицательные особенности этих алгоритмов. В частности, отмечено, что эффективность помехоподавления адаптивным режекторным фильтром уменьшается по мере увеличения полосы частот помехи; кроме того, известные алгоритмы компенсации не учитывают факта наличия информационной модуляции в помеховом сигнале. На основании изложенного делается вывод о невозможности непосредственного использования известных алгоритмов применительно к рассматриваемой задаче.

Констатируется отсутствие работ, в которых бы рассматривался синтез оптимального алгоритма фильтрации параметров навигационного сигнала при действии структурно-детериминированной помехи, а так же анализ эффективности таких алгоритмов.

В результате обосновывается актуальность темы диссертационной работы и производится выбор метода исследования.

Вторая глава посвящена синтезу алгоритма фильтрации информативных параметров навигационного сигнала. Математическая модель входного сигнала, которая используется при статистическом синтезе, имеет следующий вид:

$$y_j = S_{cj}(\lambda_{cj}, \theta_c) + S_{nj}(\lambda_{nj}, \theta_n) + n_j \qquad (1)$$

где $S_{cj}(\lambda_{cj}, \theta_c) = S_c(\lambda_c, \theta_c, t = j/f_д)$ - отсчеты полезного сигнала, взятые с частотой дискретизации $f_д$, $S_{nj}(\lambda_{nj}, \theta_n) = S_n(\lambda_n, \theta_n, t = j/f_д)$ - отсчеты помехового сигнала, n_j - дискретный белый гауссовский шум с дисперсией $\sigma^2 = \frac{N_0}{2} f_д$. Сигнал и помеха характеризуются параметрами λ_c, λ_n, которые в пространстве состояний отображаются векторами $\mathbf{x}_c$ и $\mathbf{x}_n$. Считается, что векторы параметров сигнала и помехи образуют многомерный марковский нормальный случайный процесс, описываемый следующей стохастической системой уравнений:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{ck} &= \mathbf{f}_{ck-1}(\mathbf{x}_{ck-1}) + \mathbf{g}_{ck-1}(\mathbf{x}_{ck-1})\xi_{ck} \\ \mathbf{x}_{nk} &= \mathbf{f}_{nk-1}(\mathbf{x}_{nk-1}) + \mathbf{g}_{nk-1}(\mathbf{x}_{nk-1})\xi_{nk} \\ \lambda_{ck} &= \mathbf{c}_c \mathbf{x}_{ck} \\ \lambda_{nk} &= \mathbf{c}_n \mathbf{x}_{nk} \end{aligned} \qquad (2)$$

где ξ_{ck}, ξ_{nk} - порождающие взаимно независимые дискретные белые гауссовские шумы с единичной матрицей дисперсий, $\mathbf{c}_c, \mathbf{c}_n$ - матрицы соответствующих размерностей, $\mathbf{f}_{ck}, \mathbf{f}_{nk}$ и $\mathbf{g}_{ck}, \mathbf{g}_{nk}$ - матричные функции.

Синтез оптимального алгоритма фильтрации производится на основе теории оптимальной нелинейной фильтрации в гауссовском приближении, из которой следует, что алгоритм оценивания представляется в виде следящего фильтра. Сглаживающие цепи оптимального фильтра определяются уравнениями априорной динамики параметров (2), а дискриминатор – уравнением наблюдений (1). В зависимости от наличия или отсутствия информационной модуляции в сигнале и помехе выделено три задачи:

- информационная модуляция отсутствует как в сигнале, так и в помехе,
- информационная модуляция присутствует только в сигнале,
- информационная модуляция присутствует как в сигнале, так и в помехе,

синтез дискриминатора для которых производится отдельно.

В первой задаче, где отсутствует информационная модуляция в сигнале и помехи, логарифм функции правдоподобия описывается следующей формулой:

$$\ln \rho(\lambda_k) = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{j=1}^{N} \left(S_{cj}(\lambda_{ck}) + S_{nj}(\lambda_{nk})\right)\left(y_{kj} - \frac{1}{2} S_{cj}(\lambda_{ck}) - \frac{1}{2} S_n(\lambda_{nk})\right),$$

а работа дискриминаторов по параметрам сигнала и помехи описывается следующими выражениями:

$$\frac{\partial \ln \rho(\tilde{\lambda}_k)}{\partial \mathbf{x}_c} = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{j=1}^{N} \frac{dS_{cj}(\tilde{\lambda}_{ck})}{d\mathbf{x}_c}\left(y_{kj} - S_{cj}(\tilde{\lambda}_{ck}) - S_{nj}(\tilde{\lambda}_{nk})\right)$$

$$\frac{\partial \ln \rho(\tilde{\lambda}_k)}{\partial \mathbf{x}_n} = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{j=1}^{N} \frac{dS_{nj}(\tilde{\lambda}_{nk})}{d\mathbf{x}_n}\left(y_{kj} - S_{cj}(\tilde{\lambda}_{ck}) - S_{nj}(\tilde{\lambda}_{nk})\right)$$

где знаком тильды отмечена экстраполяция значений параметров в соответствии с уравнениями априорной динамики параметров (2).

Во второй задаче, где информационная модуляция имеется только в сигнале, функция правдоподобия усредняется по возможным значениям символа передаваемой информации. Показано, что логарифм функции правдоподобия описывается следующей формулой:

$$\ln \overline{\rho}(\lambda_k) = \frac{1}{\sigma^2}\sum_{j=1}^{N} S_{nj}(\lambda_{nk})\left(y_{k,j} - \frac{1}{2}S_{nj}(\lambda_{nk})\right) - \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{N} S_{cj}^2(\lambda_{ck}) + \\ + \ln\mathrm{ch}\left(\frac{1}{\sigma^2}\sum_{j=1}^{N} - S_{cj}(\lambda_{ck})S_{nj}(\lambda_{nk}) + y_{k,j}S_{cj}(\lambda_{ck})\right)$$

а работа дискриминаторов по параметрам сигнала и помехи дается следующими выражениями:

$$\frac{\partial \ln \overline{\rho}(\tilde{\lambda}_k)}{\partial \mathbf{x}_c} = \frac{1}{\sigma^2}\sum_{j=1}^{N}\frac{dS_{cj}(\tilde{\lambda}_{ck})}{d\mathbf{x}_c}\left[-S_{cj}(\tilde{\lambda}_{ck}) + \left(y_{k,j} - S_{nj}(\tilde{\lambda}_{nk})\right)\mathrm{th}\left(\frac{1}{\sigma^2}\sum_{j=1}^{N} S_{cj}(\tilde{\lambda}_{ck})\left(y_{k,j} - S_{nj}(\tilde{\lambda}_{nk})\right)\right)\right]$$

$$\frac{\partial \ln \overline{\rho}(\tilde{\lambda}_k)}{\partial \mathbf{x}_n} = \frac{1}{\sigma^2}\sum_{j=1}^{N}\frac{dS_{nj}(\tilde{\lambda}_{nk})}{d\mathbf{x}_n}\left[y_{k,j} - S_{nj}(\tilde{\lambda}_{nk}) - S_{cj}(\tilde{\lambda}_{ck})\mathrm{th}\left(\frac{1}{\sigma^2}\sum_{j=1}^{N} S_{cj}(\tilde{\lambda}_{ck})\left(y_{k,j} - S_{nj}(\tilde{\lambda}_{nk})\right)\right)\right]$$

Для третьей задачи, где информационная модуляция присутствует как в сигнале, так и в помехе, функция правдоподобия должна быть дополнительно усреднена по возможным значениям символа информационной модуляции помехи. При этом функция правдоподобия определяется следующим выражением:

$$\ln \overline{\rho}(\lambda_k) = -\frac{1}{2\sigma^2}\sum_{j=1}^{N}\left(S_{cj}^2(\lambda_{ck}) + S_{nj}^2(\lambda_{nk})\right) + \\ + \ln\left[\mathrm{ch}\left(\frac{1}{\sigma^2}\sum_{j=1}^{N} S_{cj}(\lambda_{ck})S_{nj}(\lambda_{nk})\right)\mathrm{ch}\left(\frac{1}{\sigma^2}\sum_{j=1}^{N} y_{k,j}S_{cj}(\lambda_{ck})\right)\mathrm{ch}\left(\frac{1}{\sigma^2}\sum_{j=1}^{N} y_{k,j}S_{nj}(\lambda_{nk})\right) - \right. \\ \left. - \mathrm{sh}\left(\frac{1}{\sigma^2}\sum_{j=1}^{N} S_{cj}(\lambda_{ck})S_{nj}(\lambda_{nk})\right)\mathrm{sh}\left(\frac{1}{\sigma^2}\sum_{j=1}^{N} y_{k,j}S_{cj}(\lambda_{ck})\right)\mathrm{sh}\left(\frac{1}{\sigma^2}\sum_{j=1}^{N} y_{k,j}S_{nj}(\lambda_{nk})\right)\right]$$

а дискриминаторы могут быть описаны при помощи следующих равенств:

$$\frac{\partial \ln \overline{\rho}(\tilde{\lambda}_k)}{\partial \mathbf{x}_c} = \frac{1}{\sigma^2}\sum_{j=1}^{N}\frac{\partial S_{cj}(\tilde{\lambda}_{ck})}{\partial \mathbf{x}_c}\left[y_{k,j}\cdot\hat{b}_c - S_{cj}(\tilde{\lambda}_{ck}) - S_{nj}(\tilde{\lambda}_{nk})\cdot\hat{b}_c\hat{b}_n\right]$$

$$\frac{\partial \ln \overline{\rho}(\tilde{\lambda}_k)}{\partial \mathbf{x}_n} = \frac{1}{\sigma^2}\sum_{j=1}^{N}\frac{\partial S_{nj}(\tilde{\lambda}_{nk})}{\partial \mathbf{x}_n}\left[y_{k,j}\cdot\hat{b}_n - S_{cj}(\tilde{\lambda}_{ck})\cdot\hat{b}_c\hat{b}_n - S_{nj}(\tilde{\lambda}_{nk})\right]$$

где $\hat{b}_c, \hat{b}_n$ – оценки символов информационной модуляции сигнала и помехи, которые получаются в результате решения следующей системы линейных уравнений:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{R}\hat{\mathbf{B}}$$

где $\mathbf{Q} = \left(\sum_{j=1}^{N} y_{k,j}S_{cj}(\tilde{\lambda}_{ck}) \quad \sum_{j=1}^{N} y_{k,j}S_{nj}(\tilde{\lambda}_{nk})\right)^{\mathrm{T}}$ - вектор корреляционных сумм,

$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \sum_{j=1}^{N} S_{cj}(\lambda_{ck})S_{cj}(\tilde{\lambda}_{ck}) & \sum_{j=1}^{N} S_{nj}(\lambda_{nk})S_{cj}(\tilde{\lambda}_{ck}) \\ \sum_{j=1}^{N} S_{cj}(\lambda_{ck})S_{nj}(\tilde{\lambda}_{nk}) & \sum_{j=1}^{N} S_{nj}(\lambda_{nk})S_{nj}(\tilde{\lambda}_{nk}) \end{pmatrix}$ - корреляционная матрица сигнала и помехи.

Структурная схема устройства, реализующего алгоритм оптимального дискриминатора, синтезированного для третьей задачи, показана на рисунке 1.

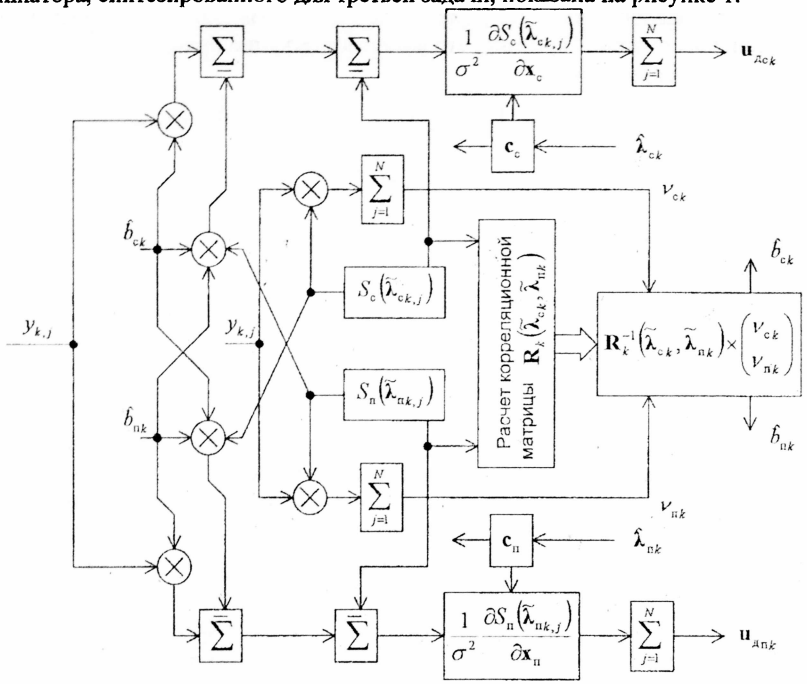


Рисунок 1 Структурная схема оптимального дискриминатора когерентного алгоритма фильтрации радионавигационных параметров сигнала

Синтезированные оптимальные алгоритмы выполняют оценивание параметров как сигнала, так и помехи, в том числе фазы несущей помехи. Поэтому полученные алгоритмы правомерно именовать когерентными по помехе (в противоположность некогерентным, рассматриваемым ниже).

Характерной особенностью синтезированных алгоритмов является то, что они основаны на компенсационном принципе, а также то, что для снятия информационной модуляции используется обратная связь по решению. В задаче, когда информационная модуляция присутствует как в сигнале, так и в помехе, оценивание символов передаваемой информации сигнала и помехи выполняется одновременно. Для этого используется расчет и обращение корреляционной матрицы сигнала и помехи.

В главе также рассматривается построение квазиоптимальных алгоритмов, получаемых из оптимальных в частных случаях: мощная помеха и слабая корреляция сигнала и помехи. Показано, что квазиоптимальные алгоритмы не содержат операция расчета и обращения корреляционной матрицы, поэтому являются более простыми для практической реализации.

Анализ характеристик синтезированных алгоритмов производится, на основе решения матричного дисперсионных уравнения (уравнение Рикатти). Для состав-

ления такого уравнения необходимо вычислить матрицу вторых производных логарифма функции правдоподобия, которая определяет дисперсию ошибки оценивания параметров в стационарном режиме.

Выражения для компонент указанной матрицы получены во второй главе. Показано, что матрица вторых производных имеет единый вид для всех трех когерентных алгоритмов и может быть записана в следующем виде:

$$\mathbf{J}(\lambda)=\begin{pmatrix} J_{\tau\tau} & J_{\tau\varphi} & J_{\tau A} & J_{\tau\phi} \\ J_{\varphi\tau} & J_{\varphi\varphi} & J_{\varphi A} & J_{\varphi\phi} \\ J_{A\tau} & J_{A\varphi} & J_{AA} & J_{A\phi} \\ J_{\phi\tau} & J_{\phi\varphi} & J_{\phi A} & J_{\phi\phi} \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} -q_c N\beta^2 & 0 & \frac{A_c}{2\sigma^2}NR' & \sqrt{q_c q_n}NR' \\ 0 & -q_c N & \frac{A_c}{2\sigma^2}NR & \sqrt{q_c q_n}NR \\ \frac{A_c}{2\sigma^2}NR' & \frac{A_c}{2\sigma^2}NR & -\frac{N}{2\sigma^2} & 0 \\ \sqrt{q_c q_n}NR' & \sqrt{q_c q_n}NR & 0 & -q_n N \end{pmatrix} \qquad (3)$$

где $q_c = A_c^2/\sigma^2$ - отношение мощности сигнала к дисперсии единичного отсчета шума, N - количество отсчетов на интервале накопления, $R = R(\Delta\tau)$ - нормированная корреляционная функция сигнала и помехи, β - параметр, определяющий эффективную ширину спектра сигнала.

В синтезированных алгоритмах производится оценивание фазы помехи при помощи ФАПЧ. С целью устранения известных недостатков (узкая полоса захвата, высокая вероятность срыва слежения, большое время восстановления), присущих таким системам, в третьей главе производится синтез оптимальных алгоритмов, использующих частотную автоподстройку частоты вместо фазовой.

В третьей главе описывается математическая модель сигнала помехи, которая используется для синтеза алгоритма фильтрации, оценивающего неполный вектор параметров помехи. Считается, что на вход устройства первичной обработки параметров поступает следующий сигнал:

$$y_j = S_{cj}(\lambda_{cj}, \theta_c) + A_{nj}(\lambda_{nj})\cos(\Phi_{nj}) + n_j \qquad (4)$$

где λ_c, λ_n - параметры сигнала и помехи, образующие многомерный марковский случайный процесс, описываемый системой (2), Φ_{nj} - полная фаза помехового сигнала. С целью упрощения получаемого алгоритма принимается допущение, что фазы помехового сигнала на границе интервалов оценивания независимы.

Показано, что, как и в случае когерентных алгоритмов, полученных во второй главе, после объединения параметров сигнала и помехи в объединенный вектор, решение задачи сводится к составлению уравнений калмановской фильтрации, в которых необходимо конкретизировать вид дискриминатора.

Синтез оптимального дискриминатора выполняется для двух задач:

- отсутствие в сигнале информационной модуляции (при этом не исключается, что в помехе модуляция может иметься);
- наличие информационной модуляции в сигнале.

Для случая отсутствия информационной модуляции в сигнале (четвертой по порядку задача) функция правдоподобия должна быть усреднена по неинформативному параметру – фазе помехового сигнала. После выполнения усреднения логарифм функции правдоподобия определяется следующим выражением:

$$\ln\overline{\rho}(\lambda_k) = \frac{1}{\sigma^2}\sum_{j=1}^{N} S_{cj}(\lambda_{ck})\left(y_{k,j} - \frac{1}{2}S_{cj}(\lambda_{ck})\right) - \frac{1}{\sigma^2}\sum_{j=1}^{N}\frac{A_n^2(\lambda_{nk})}{4} + \ln I_0\left(\frac{Z(\lambda_k)}{\sigma^2}\right)$$

где $I_k = \sum_{j=1}^{N} A_n(\lambda_{nk})\left(y_{k,j} - S_{cj}(\lambda_{ck})\right)\cos(\omega_{nk} t_{k,j})$, $Q_k = \sum_{j=1}^{N} A_n(\lambda_{nk})\left(y_{k,j} - S_{cj}(\lambda_{ck})\right)\sin(\omega_{nk} t_{k,j})$ - квадратурное разложение помехи, $Z = \sqrt{I_k^2 + Q_k^2}$ - огибающая помехи.

Дискриминаторы по параметрам сигнала и огибающей помехи описываются следующими формулами:

$$\frac{\partial \ln \bar{p}(\tilde{\lambda}_k)}{\partial \mathbf{x}_c} = \frac{1}{\sigma^2}\sum_{j=1}^{N}\left(y_{k,j} - S_{cj}(\tilde{\lambda}_{ck}) - A_n(\tilde{\lambda}_{nk})\frac{I_k \cos(\tilde{\omega}_{nk} t_{k,j}) + Q_k \sin(\tilde{\omega}_{nk} t_{k,j})}{Z(\tilde{\lambda}_k)}\right)\frac{d}{d\mathbf{x}_c} S_{cj}(\tilde{\lambda}_{ck})$$

$$\frac{\partial \ln \bar{p}(\tilde{\lambda}_k)}{\partial \Lambda_n} = \frac{1}{\sigma^2}\sum_{j=1}^{N}\frac{dA_n(\tilde{\lambda}_{nk})}{d\Lambda_n}\left[-\frac{A_n(\tilde{\lambda}_{nk})}{2} + \left(y_{k,j} - S_{cj}(\tilde{\lambda}_{ck})\right)\left(\frac{I_k \cos(\tilde{\omega}_{nk} t_{k,j}) + Q_k \sin(\tilde{\omega}_{nk} t_{k,j})}{Z(\tilde{\lambda}_k)}\right)\right]$$

Для пятой задачи (в сигнале присутствует информационная модуляция) функция правдоподобия должна быть усреднена не только по непрерывной фазе помехового сигнала, но и по дискретному значению информационной посылки. После выполнения преобразований получается следующее выражение:

$$\ln \bar{p}(\lambda_k) = -\frac{1}{2\sigma^2}\sum_{j=1}^{N}\left(S_{cj}^2(\lambda_{ck}) + \frac{A_n^2(\lambda_{nk})}{2}\right) + \frac{1}{2}\left[\ln I_0\left(\frac{Z_+(\lambda_k)}{\sigma^2}\right) + \ln I_0\left(\frac{Z_-(\lambda_k)}{\sigma^2}\right)\right] +$$

$$+ \ln\mathrm{ch}\left[\frac{1}{2}\ln I_0\left(\frac{Z_+(\lambda_k)}{\sigma^2}\right) - \frac{1}{2}\ln I_0\left(\frac{Z_-(\lambda_k)}{\sigma^2}\right) + \frac{1}{\sigma^2}\sum_{j=1}^{N} S_{cj}(\lambda_{ck}) y_{k,j}\right]$$

где $I_k^+ = \sum_{j=1}^{N} A_n(\lambda_{nk})\left(y_{k,j} - S_{cj}(\lambda_{ck})\right)\cos(\omega_{nk} t_{k,j})$, $Q_k^+ = \sum_{j=1}^{N} A_n(\lambda_{nk})\left(y_{k,j} - S_{cj}(\lambda_{ck})\right)\sin(\omega_{nk} t_{k,j})$ - квадратурное разложение помехи, рассчитанное с вычитанием полезного сигнала; $Z_+ = \sqrt{I_k^{+2} + Q_k^{+2}}$ - огибающая помехи, соответствующая данному квадратурному разложению;

$I_k^- = \sum_{j=1}^{N} A_n(\lambda_{nk})\left(y_{k,j} + S_{cj}(\lambda_{ck})\right)\cos(\omega_{nk} t_{k,j})$, $Q_k^- = \sum_{j=1}^{N} A_n(\lambda_{nk})\left(y_{k,j} + S_{cj}(\lambda_{ck})\right)\sin(\omega_{nk} t_{k,j})$ - квадратурное разложение помехи, рассчитанное со сложением полезного сигнала; $Z_- = \sqrt{I_k^{-2} + Q_k^{-2}}$ - огибающая помехи, соответствующая данному квадратурному разложению;

Дискриминаторы параметров сигнала и огибающей помехи могут быть представлены в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{x}_c}\ln \bar{p}(\tilde{\lambda}_k) = \frac{1}{\sigma^2}\sum_{j=1}^{N}\frac{d}{d\mathbf{x}_c} S_{cj}(\tilde{\lambda}_{ck})\left[-S_{cj}(\tilde{\lambda}_{ck}) + \left(y_{k,j} - S_{nj}(\tilde{\lambda}_{nk})\right)\mathrm{th}(\hat{B}_{ck})\right]$$

$$\frac{\partial}{\partial \Lambda_n}\ln \bar{p}(\tilde{\lambda}_k) = \frac{1}{\sigma^2}\sum_{j=1}^{N}\frac{dA_n(\tilde{\lambda}_{nk})}{d\Lambda_n}\left[\left(y_{k,j} - S_{cj}(\tilde{\lambda}_{ck})\mathrm{th}(\hat{B}_{ck})\right)\left(\Psi_c \cos(\tilde{\omega}_{nk} t_{k,j}) - \Psi_s \sin(\tilde{\omega}_{nk} t_{k,j})\right) - \frac{A_n(\tilde{\lambda}_{nk})}{2}\right]$$

где $\mathrm{th}\,\hat{B}_{ck} = \mathrm{th}\left(\frac{Z_+(\tilde{\lambda}_k) - Z_-(\tilde{\lambda}_k)}{2\sigma^2} + \frac{1}{\sigma^2}\sum_{j=1}^{N} S_{cj}(\tilde{\lambda}_{ck}) y_{k,j}\right)$ - оценка символа информационной модуляции, $S_{nj}(\tilde{\lambda}_{nk}) = A_n(\tilde{\lambda}_{nk})\left[\Psi_c \cos(\tilde{\omega}_{nk} t_{k,j}) - \Psi_s \sin(\tilde{\omega}_{nk} t_{k,j})\right]$ - помеховый сигнал, восстановленный с истинной фазой,

$$\Psi_c = \frac{1}{2}\left[\frac{I_k^+}{Z_+(\tilde{\lambda}_k)} + \frac{I_k^-}{Z_-(\tilde{\lambda}_k)} + \left(\frac{I_k^+}{Z_+(\tilde{\lambda}_k)} - \frac{I_k^-}{Z_-(\tilde{\lambda}_k)}\right)\mathrm{th}\left(\hat{B}_{ck}\right)\right] = \cos\hat{\varphi}_n,$$

$$\Psi_s = -\frac{1}{2}\left[\frac{Q_k^+}{Z_+(\tilde{\lambda}_k)} + \frac{Q_k^-}{Z_-(\tilde{\lambda}_k)} + \left(\frac{Q_k^+}{Z_+(\tilde{\lambda}_k)} - \frac{Q_k^-}{Z_-(\tilde{\lambda}_k)}\right)\mathrm{th}\left(\hat{B}_{ck}\right)\right] = \sin\varphi_n$$ - синусная и косинусная компоненты фазы помехового сигнала.

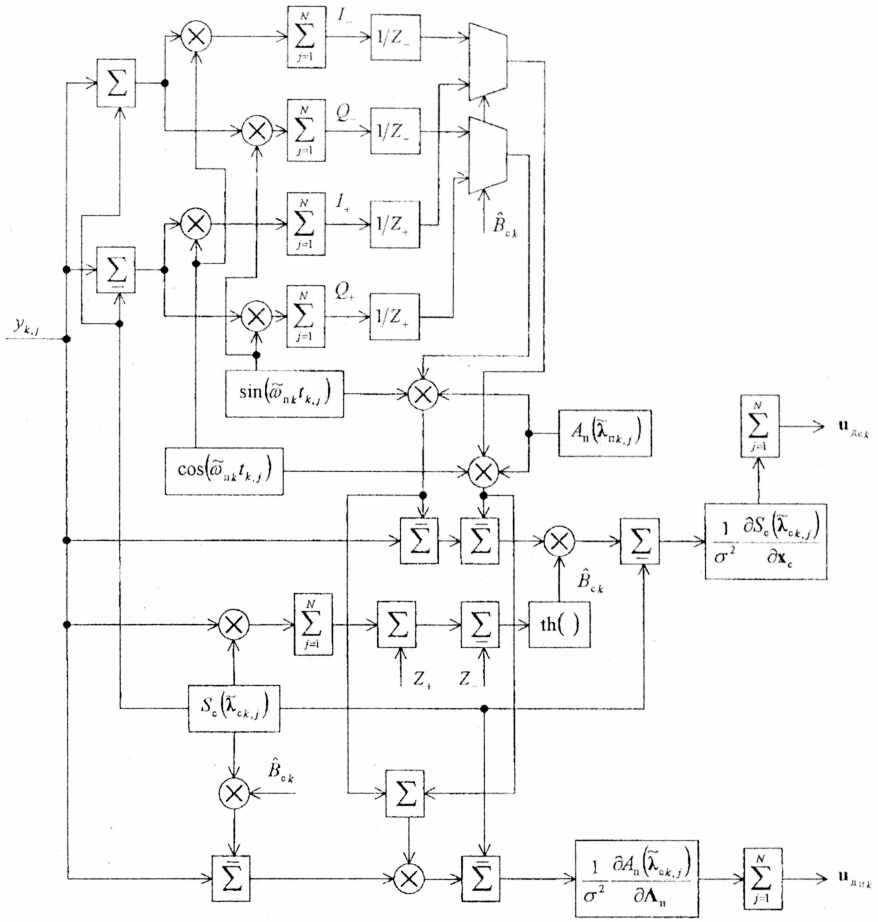


Рисунок 2 Структурная схема оптимального дискриминатора некогерентного алгоритма фильтрации радионавигационных параметров сигнала

Схема устройства, реализующего данный алгоритм дискриминатора, приведена на рисунке 2. Синтезированные алгоритмы также относятся к классу компенсационных с обратной связью по решению, при этом восстановление фазы помехи производится по рассчитанным квадратурным компонентам.

Отличительной особенностью алгоритма, полученного для случая наличия информационной модуляции в сигнале, является компенсация помехи в канале оценивания символа информационной модуляции. Для этого рассчитываются две пары квадратурных компонент помехи, соответствующие двум значениям информационного символа сигнала. Показано, что в результате выполнения операции $Z_k^+ - Z_k^-$ действие помехового сигнала канале оценки символа информационной модуляции оказывается скомпенсировано.

Анализ точности синтезированных алгоритмов в третьей главе производится с использованием полученной в третьей главе матрицы вторых производных логарифма функции правдоподобия

$$\mathbf{J}(\boldsymbol{\lambda}) = \begin{pmatrix} J_{\tau\tau} & J_{\tau\varphi} & J_{\tau A} & J_{\tau f} \\ J_{\varphi\tau} & J_{\varphi\varphi} & J_{\varphi A} & J_{\varphi f} \\ J_{A\tau} & J_{A\varphi} & J_{AA} & J_{Af} \\ J_{f\tau} & J_{f\varphi} & J_{fA} & J_{ff} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -q_c N\left(\beta^2 - R'^2\right) & q_c N R' R & \frac{A_c}{2\sigma^2} N R' & \sqrt{q_c q_n} T R' \\ q_c N R' R & -q_c N\left(1 - R^2\right) & \frac{A_c}{2\sigma^2} N R & \sqrt{q_c q_n} T R \\ \frac{A_c}{2\sigma^2} N R' & \frac{A_c}{2\sigma^2} N R & -\frac{N}{2\sigma^2} & 0 \\ \sqrt{q_c q_n} T R' & \sqrt{q_c q_n} T R & 0 & -q_n \frac{T^2 N}{3} \end{pmatrix} \quad (5)$$

где T - длительность интервала оценивания (время накопления в корреляторе навигационного приемника).

В четвертой главе на основе решения матричных дисперсионных уравнений с использованием выражений (3) и (5) проводится анализ точности фильтрации при помощи синтезированных алгоритмов.

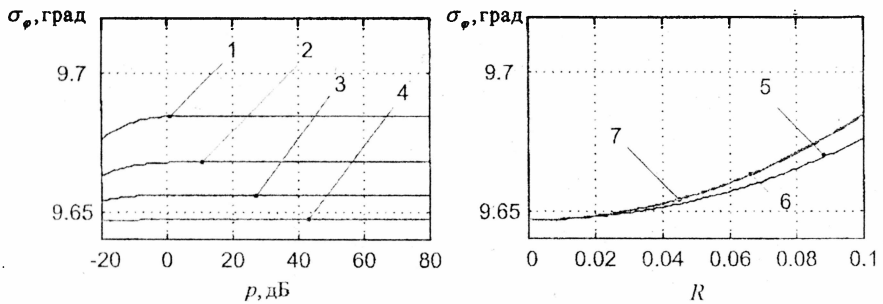


Рисунок 3 Графики зависимости СКО оценки фазы от отношения помеха/сигнал и коэффициента корреляции сигнала и помехи

1 – коэффициент корреляции $R = 0.1$
2 – $R = 0.075$
3 – $R = 0.05$
4 – $R = 0.01$
5 – отношение помеха/сигнал $p = 0 дБ$
6 – $p = 20 дБ$
7 – $p = 60 дБ$

В четвертой главе получены зависимости средней квадратичной ошибки оценивания фазы сигнала от отношения сигнал/шум, отношения помеха/сигнал, коэффициента корреляции сигнала и помехи, среднего квадратичного значения ускорения источника помехи.

На рисунке 3 приведен график зависимости средней квадратичной ошибки оценивания фазы от отношения помеха/сигнал (левый график), полученной для когерентного алгоритма. Параметром данного семейства графиков является коэффициент корреляции сигнала и помехи

Из приведенного графика следует, что синтезированные в диссертации алгоритмы фильтрации практически полностью устраняют влияние мощной помехи на следящие системы навигационной аппаратуры (кривые идут практически горизонтально).

На правом графике изображена зависимость средней квадратичной ошибки оценивания фазы от коэффициента корреляции сигнала и помехи при параметре отношение помеха/сигнал. Из рисунка следует, что ухудшение точности оценивания фазы сигнала составляет не более 0.1 град (СКО) при отношениях помеха/сигнал до 80дБ.

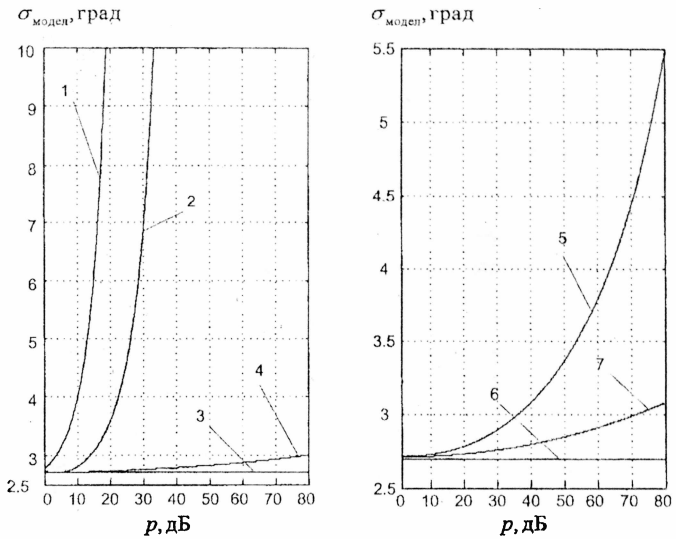


Рисунок 4 Графики зависимости точности оценивания фазы когерентными и некогерентными алгоритмами

1 – алгоритм, оптимальный для БГШ **3** – теоретическая зависимость
2 – квазиоптимальный алгоритм для слабой корреляции сигнала и помехи
4 – оптимальный когерентный алгоритм **6** – теоретическая зависимость
5 – оптимальный некогерентный алгоритм с ЧД I-го типа
7 – оптимальный некогерентный алгоритм с ЧД II-го типа

В рамках диссертационной работы разработано программное обеспечение, позволяющее провести имитационное моделирование навигационного приемника, работающего в режиме захвата и слежения при воздействии структурно-детерминированной помехи. При помощи разработанного программного обеспечение было выполнено моделирование всех полученных алгоритмов, в результате чего подтверждена их эффективность, определены зависимости точности оценивания

параметров от различных факторов. Описание результатов моделирования приведено в четвертой главе.

При помощи моделирования были определены зависимости средней квадратичной ошибки слежения за фазой для всех полученных алгоритмов.

На рисунке 4 показаны графики зависимости СКО оценивания фазы сигнала от отношения помеха/сигнал для когерентных алгоритмов оценивания (левый график) и для некогерентных алгоритмов (правый график). Из рисунка следуют следующие выводы:

- традиционные алгоритмы первичной обработки сохраняют работоспособность при отношениях помеха/сигнал не более 20 дБ (ухудшение точности оценивания фазы сигнала при этом составляет 10 град СКО);
- при помощи оптимальных алгоритмов оценивания параметров сигнала возможна практически полная устранение влияния помехи в диапазоне отношений помеха/сигнал до 80 дБ (ухудшение точности оценивания фазы составляет не более 1 град);
- алгоритмы, полученные для частного случая мощной помехи, обеспечивают такие же характеристики, что и оптимальные алгоритмы;
- алгоритм, полученный для малой корреляции сигнала и помехи, сохраняет работоспособность при отношениях помеха/сигнал до 30-35 дБ, при этом точность оценивания фазы составляет 10 град СКО.

Полученные результаты имитационного моделирования позволяют определить границы применимости полученных алгоритмов. Граница применимости определяется возможностью использования гауссовского приближения в данных условиях, а также адекватностью самой модели сигнала и помехи в виде (1) и (4). Положительный ответ на первый вопрос дают полученные результаты имитационного моделирования. Возможность использования модели наблюдения (1) и (4) определяется характеристиками радиочастотного тракта приемника, в частности линейностью используемых усилителей и шумами первого гетеродина. Известные схемы высокочастотного тракта приемника обеспечивают динамический диапазон порядка 70дБ, из чего можно сделать вывод, что обеспечиваемые характеристики помехоустойчивости в реальной аппаратуре будут определяться именно схемой высокочастотного тракта.

Кроме стационарного режима слежения при помощи разработанной модели исследован режим захвата слежения и зависимости полосы захвата от различных факторов. Отмечено, что одновременный захват по параметрам сигнала и помехи возможен при отношениях помеха/сигнал не более 60-65дБ для когерентного алгоритма и 70-75 дБ для некогерентного. Обеспечение захвата слежения в более широком диапазоне мощностей помехи возможен, если использовать поочередный захват сначала по мощной помеха, затем по слабому сигналу, либо использовать ограничение на выходе сигнального дискриминатора.

Основные результаты работы и выводы

Настоящая диссертационная работа посвящена синтезу оптимальных и квазиоптимальных алгоритмов первичной обработки сигналов при воздействии внутрисистемной структурно-детерминированной помехи, а также анализу точностных характеристик и характеристик помехоподавления, достижимых при использовании полученных алгоритмов.

Ниже представлены основные результаты работы:

1. Проведенный сравнительный анализ существующих методов повышения помехозащищенности навигационной аппаратуры показал, что традиционные алгоритмы первичной обработки навигационных сигналов не обеспечивают необходимый уровень помехоустойчивости аппаратуры, подвергающейся воздействию внутрисистемной структурно-детерминированной помехи.

2. Для трех практически важных случаев:

- сигнал и помеха не имеют информационной модуляции;
- информационная модуляция присутствует только в сигнале;
- как сигнал, так и помеха несут информационную модуляцию;

на основе теории оптимальной нелинейной фильтрации в гауссовском приближении проведен статистический синтез оптимальных алгоритмов фильтрации информативных параметров навигационного сигнала при действии структурно-детерминированной помехи

3. Для названных случаев синтезированы оптимальные алгоритмы фильтрации информативных параметров навигационного сигнала при наличии структурно-детерминированной помехи. Полученные алгоритмы является алгоритмами компенсационного типа с обратной связью по решению, которые кроме процедуры оценивания радионавигационных параметров полезного сигнала, содержат также процедуры оценивания полного вектора параметров состояния помехи: амплитуды, задержки помеховой ПСП, частоты и фазы несущей помехи, т.е. относятся к классу когерентных.

4. С целью устранения известных недостатков когерентных алгоритмов (узкая полоса захвата, высокая вероятность срыва слежения, большое время восстановления) синтезированы оптимальные алгоритмы, предполагающие некогерентную обработку помехи. Полученные алгоритмы также является алгоритмом компенсационного типа с обратной связью по решению. При этом используется система частотной автоподстройки по помеховому сигналу, а восстановление фазы несущей помехи производится на основе квадратурных компонент помехи.

5. Для частных случаев мощной помехи и слабой корреляции между сигналом и помехой получены упрощенные (квазиоптимальные) алгоритмы.

6. Для всех типов синтезированных алгоритмов в диссертационной работе получены в явном выражения для матрицы вторых производных функции правдоподобия, которые входят в матричные дисперсионные уравнения и определяют точность фильтрации в установившемся режиме.

7. Решением дисперсионных уравнений с использованием указанных матриц получены теоретические зависимости характеристик точности и помехоустойчивости оптимальных алгоритмов от различных параметров помехи: отношения помеха/сигнал, отношения сигнал/шум, коэффициента корреляции сигнала и помехи и др.

8. Разработана программа имитационного моделирования навигационной аппаратуры при действии структурно-детерминированных помех, позволяющая проверить корректность результатов синтеза, полученных с использованием гауссовского приближения, а также исследовать другие характеристики полученных алгоритмов в режиме захвата и слежения.

9. В результате теоретического анализа и моделирования было установлено что:

- традиционные алгоритмы фильтрации без компенсации (оптимальные для белого гауссовского шума) сохраняют работоспособность до отношений помеха/сигнал 15-18дБ;
- синтезированные оптимальные алгоритмы фильтрации сохраняют работоспособность при отношениях помеха/сигнал до 70-75дБ (ухудшение точности оценивания фазы составляет менее 3 град), при этом точность оценивания радионавигационных параметров когерентными и некогерентными алгоритмами одинакова;
- алгоритмы, полученные для частного случая мощной помехи обеспечивает такие же характеристики, что и оптимальный алгоритм;
- алгоритм, полученный для слабой корреляции сигнала и помехи, сохраняет работоспособность до отношений помех/сигнал 35-38дБ (при коэффициенте корреляции 0.05), что на 15дБ выше, чем традиционные алгоритмы без помехоподавления;
- одновременный захват слежения за сигналом и помехой возможен при отношениях помеха/сигнал до 60-65дБ для когерентного и 70-75дБ для некогерентного оптимального алгоритма;
- полоса захвата синтезированных оптимальных алгоритмов фильтрации от параметров помехи не зависит и мало отличается от полосы захвата следящей системы при отсутствии помехи.

10. Разработаны структурные схемы устройств, реализующих полученные алгоритмы первичной обработки сигналов в навигационной аппаратуре.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. **Шувалов А.В, Себекин Ю.Н.** Исследование алгоритмов подавления структурных помех в системах с кодовым разделением каналов. // Телекоммуникационные и вычислительные системы. Тез. докладов международного форума информатизации МФИ-2000. – М., 2000. – С.171-172.
2. **Шувалов А.В., Власов И.Б., Себекин Ю.Н.** Моделирование компенсационного метода подавления структурно-детерминированной помехи // Вестник МГТУ им.Н.Э.Баумана. Приборостроение. – 2002. – №3 – С.103-109.
3. **Шувалов А.В.** Исследование помехоустойчивости при демодуляци сигнала в присутствии структурно-детерминированной помехи // Вестник МГТУ им.Н.Э.Баумана. Приборостроение. – 2002. – №4 – С.75-83.
4. **Шувалов А.В.** Исследование компенсационного метода подавления квазигармонической помехи. // Проблемы эффективности управления и связи РВСН и применение космических систем военного назначения. Тез. докладов 40-я научно-техническая конференция МНТО РЭС им А.С.Попова – М.,2002. – С.188-191.
5. **Шувалов А.В.** Синтез и анализ компенсационного алгоритма подавления структурно-детерминированных помех. // Радиотехника (Журнал в журнале). – 2005. – №7. – С.43-49.

Подписано в печать 05.05.06 г.
Формат 60x84 1/16, Усл. Печ. Лист1
Тираж 100 экз. Заказ № 1313
Отпечатано «АллА Принт»
Тел.: (495) 621-86-07 Факс: (495) 621-70-09
www.allaprint.ru