Соколов Иван Михайлович. Метод многоканальной цифровой фильтрации помех для аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем: диссертация ... кандидата технических наук: 05.12.14 / Соколов Иван Михайлович;[Место защиты: Московский государственный технический университет гражданской авиации].- Москва, 2015.- 128 с.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ

ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ

ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ»

(МГТУ ГА)

На правах рукописи

СОКОЛОВ ИВАН МИХАЙЛОВИЧ

МЕТОД МНОГОКАНАЛЬНОЙ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

ПОМЕХ ДЛЯ АППАРАТУРЫ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СПУТНИКОВЫХ

РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Специальность 05.12.14 - Радиолокация и радионавигация

Диссертация на соискание ученой степени кандидата

технических наук

Научный руководитель - д.т.н., проф. Рубцов В.Д.

МОСКВА - 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 5

ГЛАВА 1. Помехоустойчивость аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем. Помехи. Многоканальные цифровые фильтры. 11

1.1. Типы и характеристики используемых помех 12

1.1.1. Непреднамеренные помехи 12

1.1.2. Преднамеренные помехи 14

1.1.3. Расстояния от источника помех, на которых помехоустойчивая

навигационная аппаратура потребителей будет работоспособна 14

1.2. Алгоритмы подавления, основанные на пространственной селекции сигналов 17

1.2.1. Метод формирования провалов в диаграмме направленности узкополосных

систем. Оптимальное винеровское решение 19

1.2.2. Метод формирования провалов в диаграмме направленности

широкополосных систем 20

1.2.3. Линейная адаптивная фильтрация 22

1.2.3.1. Метод наискорейшего спуска 22

1.2.3.2. Алгоритм минимальной средней квадратической ошибки 22

1.2.4. Адаптивный фильтр с бесконечной импульсной характеристикой 23

1.2.5. Линейная адаптивная фильтрация в частотной области 24

1.2.6. Непосредственное обращение выборочной ковариационной матрицы 25

1.2.7. Оптимальная обработка векторных сигналов 26

1.2.8. Метод исключения помех на основе анализа пространства сигналов 26

1.2.9. Связь между оптимальной обработкой векторных сигналов и метода

исключения помех 30

1.3. Некоторые полезные свойства метода выделения и исключения помех на

основе анализа пространства сигналов 31

1.3.1. Формирование лучей на навигационные спутники с использованием не

радиотехнических измерений 31

1.3.2. Определение углового положения источников помех 33

1.4. Алгоритм подавления узкополосных помех 34

1.5. Матричные вычисления, необходимые для решения задачи подавления помех 41

1.5.1. Обращение матрицы 41

1.5.2. Вычисление собственных векторов ковариационной матрицы 42

1.6. Моделирование 46

1.7 Основные результаты и выводы 53

ГЛАВА 2. Факторы, влияющие на качество работы многоканальных подавителей помех 55

2.1. Аналого-цифровой преобразователь 55

2.2. Динамический диапазон аналогового тракта 56

2.3. Исследование неидентичности частотных характеристик аналоговых трактов

навигационной аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем 56

2.3.1. Исследование влияния согласования канала передачи 56

2.3.2. Экспериментальная оценка влияния переотражений на частотные

характеристики аналоговых трактов 60

2.4. Основные результаты и выводы 77

ГЛАВА 3. Устранение неидентичности аналоговых трактов помехоустойчивой навигационной аппаратуры потребителей спутниковых

радионавигационных систем 79

3.1. Разбиение полосы пропускания на узкие подполосы 79

3.2. Калибровка аналоговых трактов помехоустойчивой навигационной

аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем 81

3.3. Квадратурная обработка сигналов 85

3.3.1. Формирование квадратурного сигнала аналоговым комплексным смесителем 85

3.3.2. Формирование квадратурного сигнала цифровым комплексным смесителем

87

3.3.3. Формирование квадратурного сигнала цифровой фильтром Гильберта 92

3.3.4. Формирование квадратурного сигнала при помощи дискретного

преобразования Фурье 97

3.4. Основные результаты и выводы 101

ГЛАВА 4. Экспериментальные исследования и испытания 103

4.1. Структурная схема подавителя помех 103

4.2. Эксперимент в лабораторных условиях 106

4.3. Испытания в безэховой камере 107

4.4. Полунатурные испытания помехоустойчивой навигационной аппаратуры

спутниковых радионавигационных систем 111

4.5. Основные результаты и выводы 112

Заключение 114

Список литературы 119

Список иллюстративного материала

Заключение

В диссертационной работе предложен метод устранения помех, состоящий в более точной оценке ковариационной матрицы помех и позволяющий существенно повысить характеристики, а так же расширить область применения ПНАП СРНС с антенной решеткой.

В результате проведенных исследований получены следующие основные научные результаты:

1. Разработан метод устранения помех, который основан на анализе спектра ковариационной матрицы выходных сигналов антенных элементов.
2. Проведен сравнительный анализ предложенного метода устранения помех с классическими методами подавления.
3. Предложен алгоритм решения частичной проблемы собственных значений, которая возникает в методе устранения помех.
4. Предложена математическая модель сигнально-помеховой обстановки.
5. Произведена оценка верхней границы коэффициента подавления, которая зависит от характеристик АЦП.
6. Проведен анализ влияния согласования канала передачи на уровень подавления. Для этого была разработана математическая модель, которая включает в себя S-параметры реального устройства.
7. Были проведены экспериментальные исследования влияния многолучевого распространения на частотные характеристики каналов передачи.
8. Предложен метод снижения влияния неидентичности частотных

характеристик аналоговых трактов, путем разбиения полосы пропускания на узкие подполосы. Сформулированы требования к полосовым фильтрам, разбивающим полосу пропускания ПНАП.

1. Предложен метод снижения влияния неидентичности частотных

характеристик аналоговых трактов, путем введения корректирующих КИХ фильтров.

1. Исследовано влияние способа формирования квадратурного сигнала.
2. В ходе испытаний ПНАП, в которой использовано большинство результатов диссертационной работы, были получены удовлетворительные результаты помехоустойчивости, близкие к теоретическим.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Предложенный метод устранения помех реализуем на практике.
2. В предложенном методе производится разделение сигналов на два подпространства: помеховое и шумовое. Причем, т. к. сигналы навигационных спутников на входе ПНАП имеют уровень мощности много меньше собственных шумов, то они попадают в оба подпространства. Часть мощности спутникового сигнала, которая попадает в подпространство помех, зависит от взаимного углового положения полезного сигнала и источников помех. При этом, оценка ковариационной матрицы помех является более точной, т. к. шумовая составляющая находится в другом подпространстве.
3. Предложенный метод не приводит к потере информации об угловом положении навигационных спутников, что позволяет реализовать формирование лучей, т. е. повысить отношение сигнал-шум. Кроме того появляется возможность определения углового положения источников помех при помощи поискового алгоритма Multiple Signal Classification (MUSIC).
4. Результаты моделирования показывают, что ширина провала в диаграмме направленности не зависит от межэлементного расстояния в АР, в отличие от классического метода, где при сближении антенных элементов провал в диаграмме направленности существенно увеличивается.
5. Уровень подавления напрямую зависит от разрядности АЦП и шума, приведенного к его входу.
6. Наличие переотражений в канале передачи сильно искажает его частотные характеристики.
7. Многолучевость сказывается на частотные характеристики канала передачи непредсказуемым образом. Из этого следует, что если не принимать специальных мер, коэффициент подавления сильно зависит от окружающего пространства.
8. При полосе пропускания ПНАП порядка 40 МГц (L1 ГЛОНАСС + L1 GPS), достаточно разбить ее на 4 части.
9. Метод калибровки позволяет добиться требуемой идентичности ЧХ аналоговых трактов. При этом достаточно КИХ-фильтра 10 — 12 порядков.
10. При формировании квадратурного сигнала аналоговым способом разница в уровне подавления между I и Q составляющими достигает 2 дБ. Уровень подавления в зависимости от блока данных меняется в пределах 4,5 дБ.

При формировании квадратурного сигнала при помощи цифрового комплексного смесителя, разница в уровне подавления между I и Q составляющими менее 1 дБ. Уровень подавления в зависимости от блока данных меняется в пределах 3,5 дБ.

При формировании квадратурного сигнала по средствам цифрового фильтра Гильберта 20 порядка, разница в уровне подавления между I и Q составляющими менее 2 дБ. Уровень подавления в зависимости от блока данных меняется в пределах 4,5 дБ.

При формировании квадратурного сигнала при помощи дискретного преобразования Фурье, разница в уровне подавления между I и Q составляющими достигает ~ 0 дБ. Уровень подавления в зависимости от блока данных меняется в пределах 3 дБ.

1. В ходе исследований сделан вывод о том, что выбранный метод подавления помех обеспечивает выполнение требований по помехоустойчивости навигационной аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем. При этом компенсируются неидентичности антенно-фидерных трактов, что позволяет говорить о его высокой эффективности. Ограничения, накладываемые сверху, определяются только точкой компрессии аналогового тракта. Максимальный уровень подавления можно некоторое время сохранять при помощи автоматической регулировки усиления, позволяющей удерживать мощность сигнала на входе последнего малошумящего усилителя ниже точки компрессии, однако это приводит к ухудшения отношения сигнал-шум при слежении за сигналам навигационных спутников.

**Как видно из полученных результатов, навигационные приемники, оборудованные современным антенным подавителем помех, могут обеспечивать стабильное получение координат в условиях сильных помеховых воздействий. Подобные изделия можно применять совместно с навигационной аппаратурой потребителя спутниковых радионавигационных систем, работающей в составе систем жизнедеятельности и безопасности объектов гражданского и специального назначения**