

Разработка алгоритмов уменьшения влияния узкополосных помех на аппаратуру ГНСС и их реализация на специализированных СБИС семейства NeuroMatrix

Михаил Юрьевич Клименко
ЗАО НТЦ "Модуль", Москва, Россия
m.klimenko@module.ru

Введение

На работу глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) оказывает влияние множество помех естественного и искусственного происхождения. К первым относятся внутренние шумы приёмника, а также шумы, возникающие вследствие атмосферных явлений. Искусственные помехи, связанные с деятельностью человека, подразделяются на непредумышленные и организованные. К непредумышленным относятся сигналы радиоэлектронных систем, работающих в тех же частотных диапазонах, что и ГНСС, например, спутниковые системы связи Iridium и Inmarsat, сигналы спутникового телевидения, а также сигналы других ГНСС. Организованные помехи применяются специально для противодействия аппаратуре ГНСС.

Классификация помех

В [1, 2] рассмотрены отличительные признаки радиосигналов, оказывающих негативное влияние на аппаратуру ГНСС и вследствие этого считающихся помехами. Принята следующая классификация помех:

1. По типу:
 - a. Однотоновые помехи и их производные;
 - b. Сигналы с АМ, ЧМ и ФМ;
 - c. Шумоподобные сигналы;
2. По центральной частоте помехи:
 - a. Внутриполосные;
 - b. Внеполосные;
3. По ширине полосы (по отношению полосы частот, занимаемой помехой, к полосе частот используемого сигнала ГНСС)
4. По мощности, измеряемой как отношение сигнал/шум применительно к помехе;
5. По временным характеристикам:
 - a. Непрерывная помеха;
 - b. Импульсная помеха.

Обычно, импульсные помехи имеют скажность не менее 8-10 [1], в соответствии с этим непрерывная помеха с той же частотой и мощностью будет более существенно влиять на приёмник. Помимо этого, следует отметить существование помех, имитирующих навигационное поле, а также постановщиков помех, осуществляющих переизлучение запаздывающего сигнала.

Влияние помех на аппаратуру ГНСС

Радиоэлектронные помехи воздействуют на все элементы тракта навигационного приёмника [2], что приводит к следующим эффектам:

1. Потеря слежения за спутниками и/или невозможность их обнаружения;
2. Общее уменьшение энергетического потенциала;
3. Увеличение ошибки при кодовых измерениях;
4. Увеличение ошибки при фазовых измерениях;
5. Повышение вероятности ошибочного приема символа навигационного сообщения.

В первом случае вред от помех очевиден — в области действия постановщика помех становится невозможным использование аппаратуры ГНСС. Другие факторы значительно уменьшают точность формирования «сырых» измерений, таких как псевдозадержки и псевдодоплеровские смещения частот, что, соответственно, уменьшает точность позиционирования.

Методы подавления помех

Способы повышения помехоустойчивости навигационного приемника можно расположить в порядке увеличения их эффективности (в скобках указана мощность помехи (отношение мощности помехи к мощности шума), при которой сохраняется надежная работа навигационного приемника) [2]:

1. Увеличение полосы сигнала (до 10 дБ);
2. Увеличение мощности передатчика на космическом аппарате (до 20 дБ);
3. Комплексование навигационных приемников (до 30 дБ);
4. Применение цифровых аппаратных фильтров (до 40 дБ);
5. Использование частотно-временной коррекции (до 50 дБ);
6. Применение фазированных антенных решеток (ФАР) с динамическим изменением диаграммы направленности (ДН) антенны (СРРА-антенны) (до 60 дБ);
7. Использование цифровых активных ФАР (АФАР) с формированием ДН (beamforming в англоязычной литературе) (до 70 дБ).

Первые два варианта зависят от используемого сигнала и космического аппарата, не могут быть изменены с Земли после запуска. Последние два способа очень сильно усложняют и удорожают аппаратуру потребителя, что не всегда приемлемо и резко сужает возможный круг пользователей.

Комплексование навигационных приёмников не позволяет значительно увеличить помехоустойчивость навигационного приёмника. Это объясняется тем, что инерциальные навигационные системы (ИНС) не подвержены влиянию радиотехнических помех и имеют высокую точность измерений в краткосрочной перспективе. Однако ошибка определения навигационных параметров накапливается с течением времени и требует коррекции от ГНСС.

Использование частотно-временной коррекции является эффективным методом, но очень сложно реализуемым в реальном масштабе времени. Это вызвано тем, что выполнение этого метода следует проводить при помощи микро-ЭВМ параллельно с работой петель слежения, дискриминаторов, решением навигационной и скоростной задач и разрешением неоднозначностей при работе в режиме РТК. Исходя из этого, для возможности производить подавление помехи в частотной области, необходимо иметь значительный запас вычислительных мощностей, которые не будут задействованы при отсутствии помех.

Среди цифровых фильтров выделяют две категории:

1. Рекурсивные фильтры (с бесконечной импульсной характеристикой);
2. Нерекурсивные фильтры (с конечной импульсной характеристикой).

У обоих вариантов есть свои достоинства и недостатки. Для разработки подавителя были выбраны КИХ-фильтры из-за следующих свойств:

1. КИХ-фильтры всегда устойчивы и не переходят в режим самовозбуждения;
2. Можно синтезировать фильтр с линейной ФЧХ;
3. Простота реализации с алгоритмической стороны.

Исходные данные для разработки подавителя

Целью произведенной работы являлось разработать подавитель узкополосных помех с последующим внедрением в существующий приёмник ГНСС, построенный на базе СБИС 1879ВЯ1Я. СБИС обеспечивает прием аналоговых сигналов, преобразование их в цифровой код и программную цифровую обработку. В состав СБИС входят тракт приема аналоговых сигналов (АЦП), блок предварительной обработки сигналов (БПОС), блок первичной цифровой обработки на основе двух процессоров NeuroMatrix NMC3 (DSP-процессоры), RISC-процессор вторичной обработки ARM1176JZF-S, внутреннее ОЗУ объемом 16 Мбит, блоки синхронизации, устройство контроля JTAG, а также широкий набор периферийных устройств. СБИС работает на внутренней тактовой частоте 327,68 МГц.

БПОС содержит 24 цифровых канала, 12 из которых имеют доступ к 3 блокам КИХ-фильтров, т.е. на 4 канала приходится один блок. Каждый из блоков содержит четыре КИХ-фильтра 64-го порядка с 8-битными коэффициентами. В пределах одного блока фильтры могут быть коммутированы последовательно и/или параллельно для реализации от одного до четырёх подавителей. Помимо этого, при параллельной коммутации имеется возможность увеличить разрядность коэффициентов фильтра с 8 до 16 бит.

Схема приёмника, который был взят за основу при разработке подавителя, приведена на рисунке 1. Он содержит антенну, аналоговый тракт (например, ГЛОНАСС L1), АЦП и цифровые каналы, содержащие аппаратные КИХ-фильтры. Каждый аппаратный цифровой спутниковый канал содержит цифровой гетеродин, ФНЧ, дециматор и нормализатор. В сигнальном процессоре (NeuroMatrix) осуществлена реализация разработанных алгоритмов обнаружения узкополосных помех и расчёта коэффициентов аппаратных КИХ-фильтров, а также реализованы корреляционная обработка сигнала и петли слежения (ФАП и ССЗ). Решение навигационной задачи осуществляется в процессоре общего назначения (ARM), входящем в состав СБИС 1879ВЯ1Я. Таким образом, за исключением аналогового тракта, весь навигационный приёмник построен на базе рассматриваемой аппаратно-программной платформы.

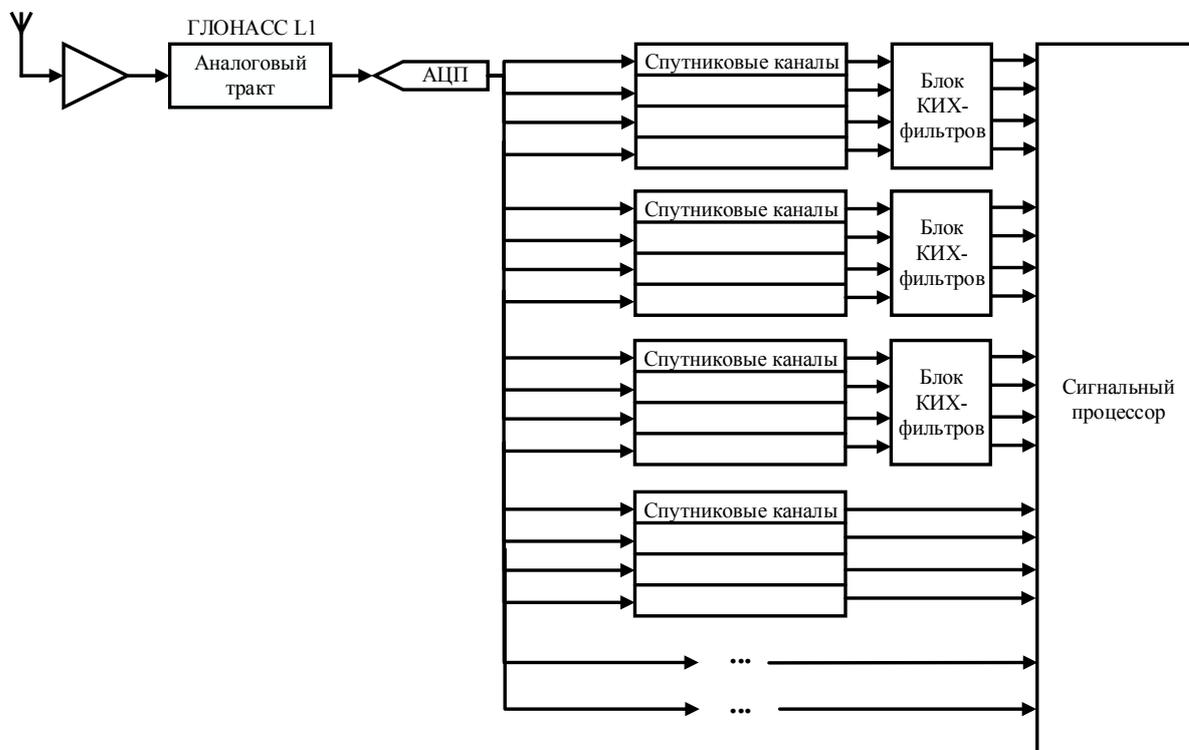


Рис. 1 — Структурная схема приёмника ГНСС

Алгоритм обнаружения помех

Узкополосные помехи удобно выявлять в частотной области. Архитектура аппаратно-программной платформы обеспечивает двойную буферизацию принимаемого сигнала во внутренней памяти в виде кадров (длительностью 1 мс) и их последующую обработку (дискретное преобразование Фурье – ДПФ) в режиме реального времени с помощью сигнального процессора [4]. Кадр представляет собой оцифрованные отсчеты сигнала после цифрового гетеродинирования и децимации. В связи с тем, что ДПФ производится от конечного по времени сигнала, наблюдается эффект «растекания спектра», изображенный на рисунке 2. Для минимизации этого эффекта применяется поэлементное перемножение отсчетов сигнала с отсчетами оконной функции (взвешивание).

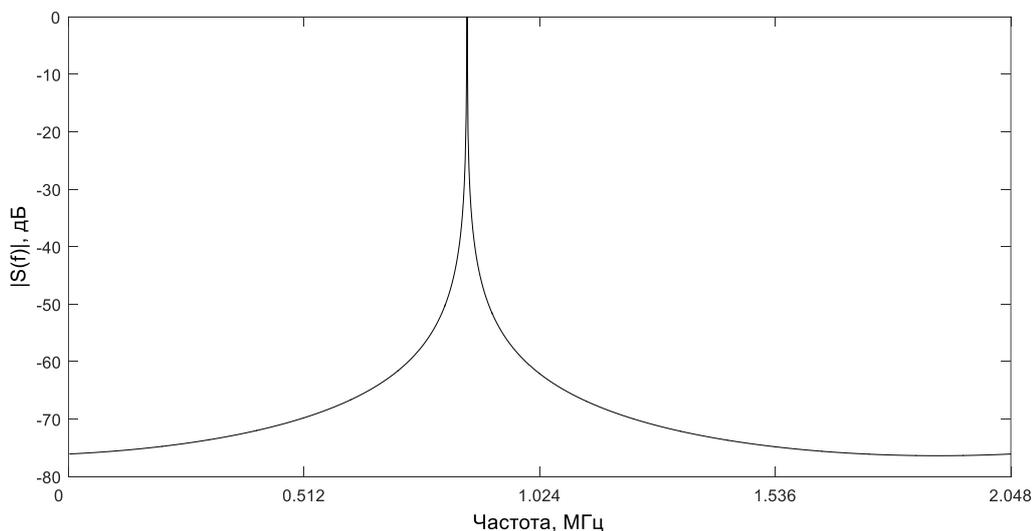


Рис. 2 — ДПФ гармонического колебания без применения оконных функций

Для обеспечения максимального динамического диапазона при обнаружении помех было использовано окно Блэкмана-Наталла [6]:

$$w(i) = a_0 - a_1 \cdot \cos\left(\frac{2\pi i}{N-1}\right) + a_2 \cdot \cos\left(\frac{4\pi i}{N-1}\right) - a_3 \cdot \cos\left(\frac{6\pi i}{N-1}\right) \quad (1)$$

При обнаружении помех ДПФ производится над всем кадром (1 мс) сигнала. Время накопления определяет разрешающую способность анализатора спектра, что позволяет точнее определить частоты помех.

Обнаружение узкополосных помех производится в соответствии с алгоритмом, блок-схема которого изображена на рисунке 3. В ходе работы алгоритма осуществляется копирование буфера в независимую память, наложение оконной функции, получение амплитудного спектра с использованием алгоритма ДПФ для последующего циклического поиска максимумов. Для более точного вычисления дисперсии и математического ожидания амплитудного спектра, максимум и прилегающие области обнуляются.

Расчёт статистических характеристик амплитудного спектра требуется для установления порога, с которым последовательно сравниваются все обнаруженные на предыдущем шаге максимумы. При превышении порога принимается решение о наличии помехи на данной частоте и увеличивается счётчик обнаруженных помех.

Данные о количестве и частотах помех являются базовыми для работы алгоритма расчёта коэффициентов аппаратных КИХ-фильтров.

В связи с тем, что анализатор помеховой обстановки и КИХ-фильтр имеют разную разрешающую способность по частоте, перед использованием информации о положении помех необходимо произвести пересчёт их положения с удалением возможных дубликатов

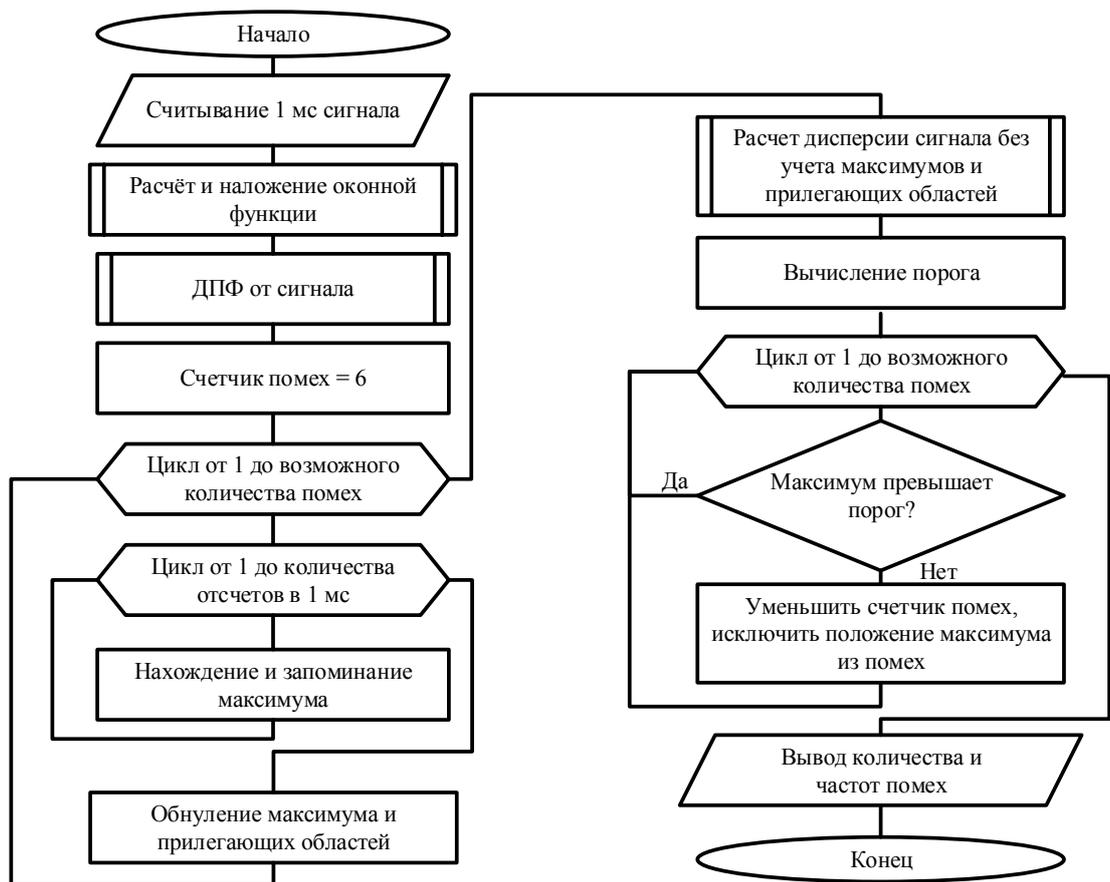


Рис. 3 — Блок-схема алгоритма обнаружения узкополосных помех

Расчет коэффициентов КИХ-фильтра

Для синтеза комплексной импульсной характеристики (ИХ) фильтра необходимо выполнить следующие действия:

1. Синтезировать АЧХ идеального фильтра по данным алгоритма обнаружения помех (АЧХ идеального фильтра имеет коэффициент передачи, равный нулю в полосе помехи и единице в полосе навигационного сигнала, не подверженного влиянию помехи);
2. Произвести комплексное умножение рассчитанной ранее идеальной АЧХ на комплексную экспоненту для синтеза фильтра с линейной АЧХ и, как следствие, постоянной групповой задержкой;
3. Выполнить алгоритм обратного дискретного преобразования Фурье (ОДПФ) для получения отсчетов комплексной импульсной характеристики из отсчетов комплексной частотной характеристики.
4. Рассчитать значения оконной функции и произвести взвешивание оконной функции с комплексной ИХ.

Использование оконных функций позволяет минимизировать т.н. эффект Гиббса, вызванный конечным числом отсчетов ИХ. Эффект Гиббса проявляется в значительных пульсациях АЧХ фильтра между заданными в п.1 отсчетами АЧХ.

В результате анализа и моделирования среди множества оконных функций было выбрано окно Кайзера с параметром $\beta = 5.5$, использование которого показало компромисс в достижении противоречивых требований по минимизации пульсаций в полосе пропускания и увеличению минимального коэффициента подавления фильтра.

Для обнаружения помех было выбрано достаточно большое время накопления сигнала с целью повышения разрешающей способности анализатора спектра. Количество отсчетов зависит от частоты дискретизации сигнала, минимальная частота дискретизации составляет 2,048 МГц для С/А-сигнала GPS и 1,024 МГц – для СТ-сигнала ГЛОНАСС. Таким образом, минимальное число отсчетов в кадре составит 2048 и 1024, соответственно. Для реализации подавителя помех на аппаратно-программной платформе требуется

пересчитать положение помех, уменьшая разрешение по частоте. Для этого каждое значение положения помехи умножается на порядок фильтра и делится на количество отсчетов. Полученные положения помех используются при синтезе идеальной АЧХ фильтра.

Драконический период обращения спутника системы ГЛОНАСС составляет 43200 с. Исходя из высоты орбиты спутник будет доступен примерно в течение 17000 с. С учетом возможного доплеровского смещения ± 7000 Гц можно рассчитать примерное смещение частоты сигнала ГНСС, обусловленное лишь движением спутника, – оно равно 1 Гц/с. Таким образом, в краткосрочной перспективе при постоянной частоте помехи нет необходимости постоянно пересчитывать АЧХ фильтра из-за гетеродинирования сигнала в канале навигационного приемника.

Для создания фильтра с линейной ФЧХ необходимо умножить имеющуюся идеальную АЧХ на множитель, обеспечивающий линейность фазовой характеристики. Математически это представляет собой умножение идеальной АЧХ на комплексную экспоненту:

$$H(j\omega) = |H(j\omega)| \cdot \exp(j \cdot \Phi(\omega)) \quad (2)$$

В результате умножения действительного массива значений идеальной АЧХ на массив значений комплексной экспоненты получается массив значений комплексной частотной характеристики. Предварительная комплексная импульсная характеристика может быть получена при проведении ОДПФ. Для оценки корректности предыдущего шага следует проверить наличие центральной симметрии в предварительной ИХ.

Для завершения процесса синтеза ИХ фильтра применялась оконная функция к действительной и мнимой частям ИХ фильтра. В результате была получена комплексная импульсная характеристика фильтра, изображенная на рисунке 4.

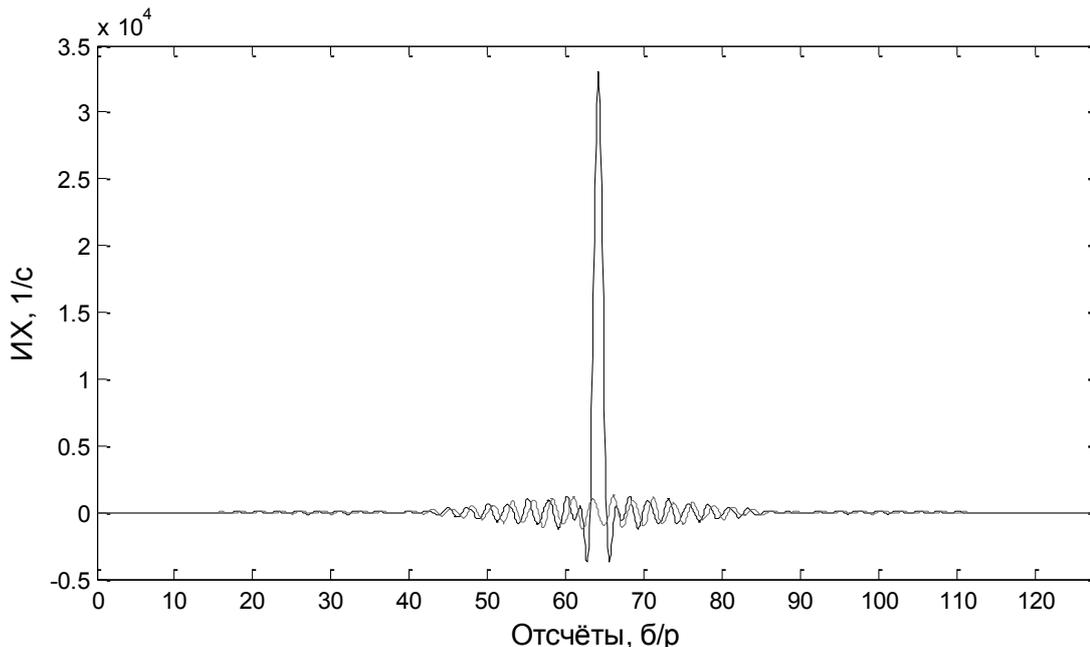


Рис. 4 — Комплексная ИХ фильтра

Расчет шумовых ошибок и параметров синтезируемого фильтра

Влияние фильтра на работу навигационного приемника оценивалось при помощи пакета прикладных программ FALCON 2.1, предназначенного для анализа помехоустойчивости приемников сигналов GPS и ГЛОНАСС. Этот программный продукт позволяет вычислить статистические характеристики выходных параметров аппаратной части приемника (математическое ожидание и дисперсию).

На основе статистических характеристик были рассчитаны ошибки измерений дальности по коду и по несущей, вызванные как шумом приемника, так и многолучевым распространением сигнала. Расчет показал, что шумовая ошибка при подавлении помех по кодовым измерениям снижается на 30%, по фазовым измерениям – на 251%.

Таблица 1

| | Без подавления | С подавлением |
|--|----------------|---------------|
| Шумовая ошибка по кодовым измерениям, м | 1.3 | 1.69 |
| Шумовая ошибка по фазовым измерениям, мм | 0.43 | 1.08 |

Расчет шумовых ошибок производился при энергетическом потенциале 40 дБГц и при времени накопления 0,5 с. Результаты были получены для наихудшего случая, когда помеха воздействует на каждый канал приемника.

Коэффициенты аппаратного КИХ-фильтра, входящего в состав СБИС 1879ВЯ1Я, рассчитывались по рассмотренному выше алгоритму. Эффективность фильтрации оценивалась для различных конфигураций КИХ-фильтра.

При использовании фильтра 128-го порядка и 16-битных коэффициентов были получены следующие результаты:

- полоса задерживания по уровню -40 дБ: 1,866% от частоты дискретизации;
- полоса задерживания по уровню -3 дБ: 4,63% от частоты дискретизации;
- амплитуда пульсаций АЧХ в полосе пропускания: 0,065 дБ;
- минимальный уровень подавления: 54 дБ.

При использовании фильтра 64-го порядка с 16-битными коэффициентами минимальный уровень подавления уменьшается до 45 дБ. Использование 8-битных коэффициентов нецелесообразно вследствие недостаточного подавления помехи и чрезмерных пульсаций в полосе пропускания, достигающих 5 дБ.

Результаты экспериментальных исследований

Для проверки работоспособности фильтра применялся векторный генератор сигналов Agilent N5182A, на котором имитировалось навигационное поле с аддитивной узкополосной помехой. По результатам эксперимента без подавления помех срыв слежения за сигналом КА происходил при помехе 21,7 дБ, при использовании 8-битное квантование, и при 10,24 дБ – при 1-битном. В случае применения КИХ-фильтра 64-го порядка срыв происходил при помехе 57,22 дБ, а при использовании КИХ-фильтра 128-го порядка – при 66,85 дБ. Таким образом, выигрыш относительно 1-битного квантования составил 45,72 и 55,35 дБ, соответственно.

Кроме того, проводился эксперимент по оценке влияния на работу приемника шести равноудаленных узкополосных помех, расположенных в полосе сигнала КА. Ширина полосы задерживания сохранялась постоянной для каждой помехи с точностью до ошибок измерения. Была доказана работоспособность навигационного приемника при вырезании 11,2% спектра. По мере увеличения количества помех быстро деградирует система слежения и резко увеличивается вероятность битовой ошибки в навигационном сообщении в связи с вырезанием большого количества спектра навигационного сигнала. Однако в реальной обстановке помехи могут быть расположены близко одна к другой и находиться в пределах одной полосы задерживания, что увеличивает количество одновременно подавляемых помех до 10–16.

Наряду с этим проводились эксперименты с применением эфирного сигнала. На входы СВЧ-сумматора поступали сигналы с активной антенны и генератора N5182A, результирующий сигнал подавался на вход навигационного приемника, построенного на базе СБИС 1879ВЯ1Я. Результаты эксперимента с точностью до ошибок измерений повторили результаты, полученные в ходе эксперимента с применением имитации навигационного поля на векторном генераторе сигналов.

Для оценки эффективности разработанного подавителя было произведено сравнение с существующими аналогами. Для этого были использованы приёмники Javad Delta и Topcon NET-G3A. В результате экспериментов сделан вывод, что разработанный подавитель показывает сравнимые результаты и величины запаса помехоустойчивости.

Анализ результатов исследования

Автор считает, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:

1. Разработка помехоустойчивого приёмника ГНСС на отечественной элементной базе, показывающего результаты сравнимые с существующими импортными аналогами;

2. Произведена адаптация существующих алгоритмов синтеза КИХ-фильтров для расчета комплексной импульсной характеристики, обеспечивающей подавление множества помех;
3. Произведено компьютерное моделирование различных каскадов навигационного приёмника в среде MATLAB для оценки влияния узкополосных помех на различные каскады приёмника;
4. Изучено влияние разработанного подавителя на шумовые ошибки кодовых и фазовых измерений при помощи пакета FALCON.
5. В соответствии с результатами исследования сделан вывод о возможности использования режима высокоточного позиционирования в реальном времени (РТК) даже в сложной помеховой обстановке

Заключение

Проведенные эксперименты доказали работоспособность алгоритмов и высокую эффективность использования КИХ-фильтров в составе СБИС 1879ВЯ1Я при подавлении узкополосных помех в сигналах ГНСС. В соответствии с результатами моделирования, несмотря на рост шумовых ошибок, разработанный подавитель можно использовать для высокоточных измерений, в частности в режиме РТК.

Библиографический список

1. *Fabio Dovis* GNSS Interference Threats and Countermeasures // Artech House, 2015
2. *Rene Jr. Landry, Vincent Calmettes, Alain Ducasse* Impact of interference on the new COSSAP GPS receiver and mitigation techniques evaluation // Navigation 2000, ION National Technical Meeting, Long Beach, CA, 21-23 Janvier, 1998
3. СБИС 1879ВЯ1Я, описание. // Доступно по адресу http://www.module.ru/catalog/micro/sbis_1879vya1ya/
4. ЗАО НТЦ «Модуль». Микросхема интегральная 1879ВЯ1Я. Руководство по эксплуатации.
5. *Кашкаров В.А., Мушкаев С.В.* Организация параллельных вычислений в алгоритмах БПФ на процессоре NM6403 // Цифровая обработка сигналов. - 2001.
6. *С. А. Бахурин* Спектральный анализ на ограниченном интервале времени. Оконные функции // Доступно по адресу <http://www.dsplib.ru/content/win/win.html>