

ПОДАВЛЕНИЕ УЗКОПОЛОСНЫХ ПОМЕХ В СИГНАЛАХ ГНСС С ПОМОЩЬЮ КИХ-ФИЛЬТРОВ

М.Клименко

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), как и любые другие радионавигационные системы, подвержены влиянию помех различного происхождения. Необходимость сохранения высокого уровня отказоустойчивости ГНСС требует снижения влияния помех на аппаратуру потребителей. Для повышения надежности навигационного приемника и борьбы с помехами в навигационном сигнале применяются, в частности, КИХ-фильтры. Рассмотрим алгоритм обнаружения помех и расчета коэффициентов КИХ-фильтра на основе СБИС 1879ВЯ1Я производства НТЦ "Модуль". Решение обеспечивает подавление одновременно нескольких узкополосных помех в реальном масштабе времени. Оценим влияние работы КИХ-фильтра на характеристики навигационного сигнала.

КЛАССИФИКАЦИЯ ПОМЕХ

На работу глобальных навигационных спутниковых систем оказывает влияние множество помех как естественного, так и искусственного происхождения. К первым относятся внутренние шумы аппаратуры потребителя, космические шумы, атмосферные помехи в виде грозных разрядов, ионосферные задержки и многолучевое распространение сигнала. Такой вид помех связан с природными электромагнитными процессами и явлениями. Искусственные помехи, обусловленные деятельностью человека, подразделяются на непредумышленные и организованные. К непредумышленным можно отнести различные индустриальные помехи, сигналы работающих поблизости аппаратов спутниковой и мобильной связи (например, систем Iridium и Inmarsat), сигналы станций любительской радиосвязи УКВ-диапазона, включенные СВЧ-печи, сигналы

спутникового телевидения и сигналы других ГНСС. Организованные помехи применяются специально для противодействия навигационным приемникам.

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

- по типу (однотоновые помехи и их производные, сигналы с АМ, ЧМ и ФМ, шумоподобные сигналы);
- по центральной частоте (внутриполосные и внеполосные помехи);
- по ширине полосы (по отношению полосы, занимаемой помехой, к полосе используемого сигнала СТ- или ВТ-кода);
- по мощности, измеряемой как отношение сигнал/шум применительно к помехе;

- по временным характеристикам (продолжительная или импульсная помехи).

Следует отметить также наличие помех, имитирующих навигационное поле, и постановщиков помех, выполняющих переизлучение сигнала. Влияние этих помех заключается в подмене навигационного сообщения, а не в его деформации.

ВЛИЯНИЕ ПОМЕХ НА НАВИГАЦИОННЫЙ ПРИЕМНИК И МЕТОДЫ ИХ ПОДАВЛЕНИЯ

Радиоэлектронные помехи воздействуют на каждый тракт навигационного приемника [2], что приводит к следующим эффектам:

- потере слежения за спутниками и / или невозможности их обнаружения;
- общему уменьшению энергетического потенциала;
- увеличению ошибки при кодовых измерениях;
- увеличению ошибки при фазовых измерениях;
- повышению вероятности ошибочного приема символа навигационного сообщения.

В первом случае вред от помех очевиден – пользователь не может определить свои координаты. Другие факторы значительно ухудшают точность измерения псевдозадержек, псевдодоплеровских смещений частот и, соответственно, координат приемника.

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. Расширение 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 (до 70 дБ).

Первые два способа, зависящие от вида используемого сигнала и параметров космического аппарата (КА), недоступны для изменения потребителями. Последние два способа значительно усложняют и удорожают аппаратуру потребителя, что резко сужает круг потенциальных пользователей.

Комплексирование навигационных приемников не является методом борьбы с помехами, это способ уменьшения их влияния на аппаратуру потребителей ГНСС. Инерциальные навигационные системы (ИНС) не подвержены влиянию радиотехнических помех и имеют сравнительно высокую точность измерений. Однако ошибка определения навигационных параметров накапливается с течением времени и требует коррекции от ГНСС.

Использование частотно-временной коррекции – эффективный метод, но его слишком сложно реализовать в режиме реального времени, поскольку коррекция выполняется параллельно с функционированием петель слежения, дискриминаторов, решением навигационной и скоростной задач, а также разрешением неоднозначностей при работе в режиме реального времени (Real Time Kinematic – RTK). Поэтому для подавления помехи в частотной области необходимо иметь значительный запас вычислительных мощностей.

Оптимальный способ подавления помех – применение цифровых фильтров, которые подразделяются на две категории:

- рекурсивные (с бесконечной импульсной характеристикой – БИХ);
- нерекурсивные (с конечной импульсной характеристикой – КИХ).

У каждого варианта есть достоинства и недостатки. В навигационной аппаратуре предпочтительно использовать КИХ-фильтры, преимущества которых заключаются в следующем:

- всегда устойчивы и не переходят в режим самовозбуждения;
- фильтр можно синтезировать с линейной ФЧХ;
- простая аппаратная и алгоритмическая реализация.

АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОМЕХ

Узкополосные помехи удобно выявлять в частотной области. В качестве аппаратно-программной платформы для реализации алгоритма обнаружения помех и расчета коэффициентов фильтров была выбрана СБИС 1879ВЯ1Я [3] – цифровой унифицированный программный приемник класса система-на-кристалле.

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.

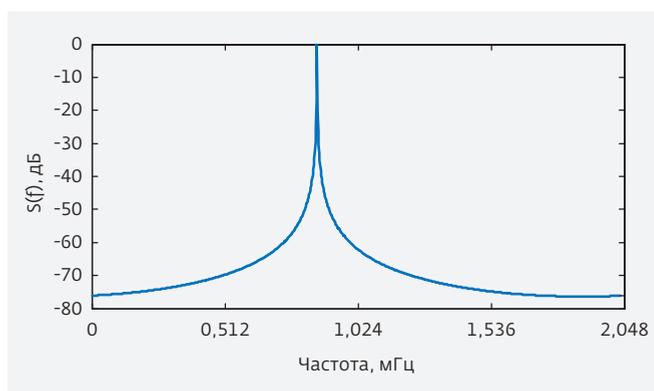


Рис.1. ДПФ гармонического колебания без оконных функций

Архитектура СБИС 1879ВЯ1Я 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.

Поскольку ДПФ производится от конечного по времени сигнала, наблюдается эффект растекания спектра (рис.1). Поэтому перед выполнением ДПФ сигнала обычно применяют перемножение (взвешивание) сигнала с оконной функцией [5].

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

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

При обнаружении помех ДПФ производится над всем кадром (1 мс) сигнала. Время накопления определяет разрешающую способность анализатора спектра.

Для обнаружения узкополосных помех в частотной области авторами предложен эффективный алгоритм (рис.2), при котором выполняется циклический поиск максимумов в амплитудном спектре с последующим обнулением максимума и прилегающих областей. Это необходимо для вычисления дисперсии и математического ожидания амплитуды спектра сигнала без учета возможных помех.

После нахождения математического ожидания и дисперсии был установлен порог, с которым последовательно сравнивались исключенные на предыдущем шаге максимумы. При превышении порога счетчик истинных помех инкрементировался и запоминалось положение помехи. Данные, полученные по окончании алгоритма, использовались для расчета коэффициентов фильтра.

У анализатора помеховой обстановки и КИХ-фильтра разная разрешающая способность по частоте, поэтому перед использованием информации о положении помех

необходимо произвести пересчет их положения с возможным удалением дубликатов.

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ КИХ-ФИЛЬТРА

Для синтеза комплексной импульсной характеристики (ИХ) фильтра необходимо выполнить следующие действия (рис.3):

- 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);
- умножить отсчеты идеальной АЧХ на отсчеты комплексной экспоненты (необходимо для синтеза фильтра с линейной ФЧХ и постоянной групповой задержкой);
- выполнить алгоритм обратного дискретного преобразования Фурье (ОДПФ) для получения отсчетов комплексной импульсной характеристики из отсчетов комплексной частотной характеристики;
- рассчитать значения оконной функции и умножить отсчеты действительной и мнимой частей ИХ на отсчеты оконной функции.

Если не использовать оконные функции, то в полученной АЧХ фильтра будут значительные пульсации между заданными в п. 1 отсчетами АЧХ. Это вызвано эффектом Гиббса из-за ограниченного количества отсчетов ИХ.

Среди множества оконных функций было выбрано окно Кайзера с параметром $\beta=5,5$, что объясняется необходимостью минимизировать пульсации в полосе пропускания и одновременно увеличить минимальный коэффициент 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

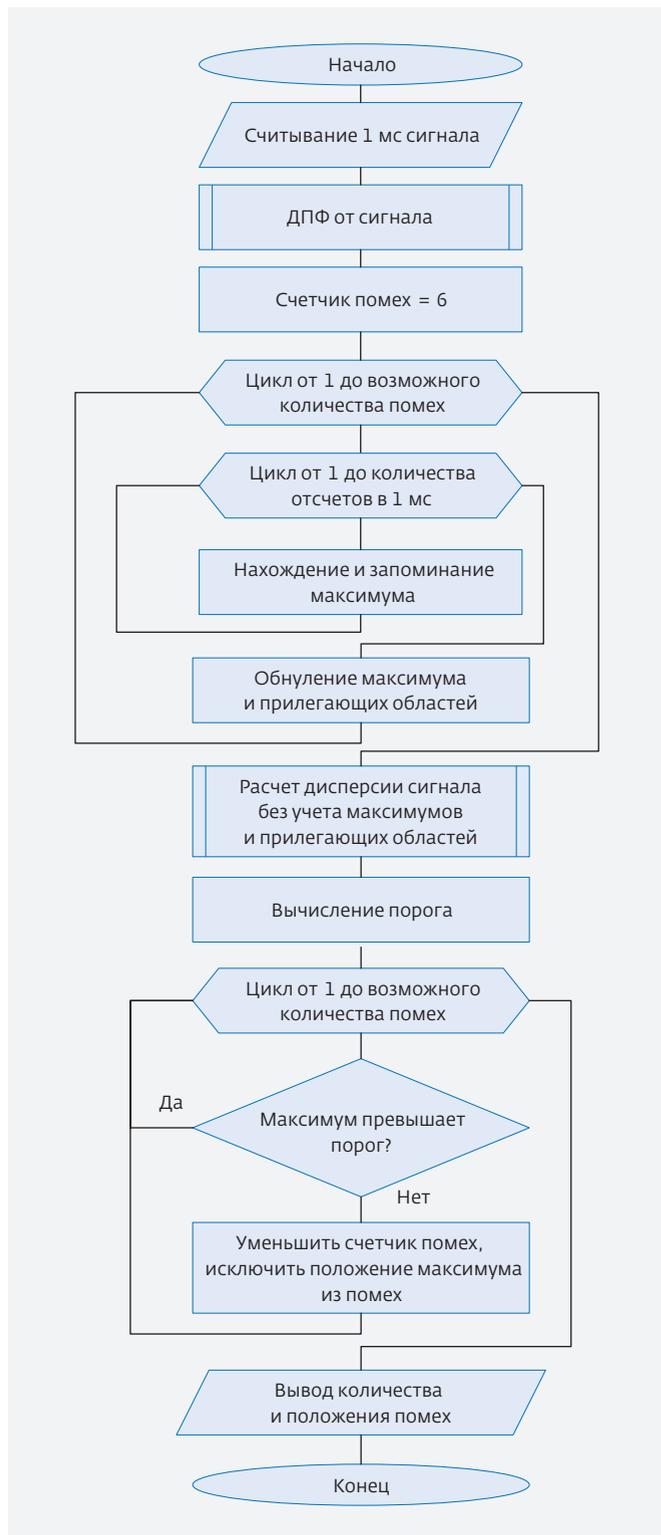


Рис.2. Блок-схема алгоритма обнаружения узкополосных помех

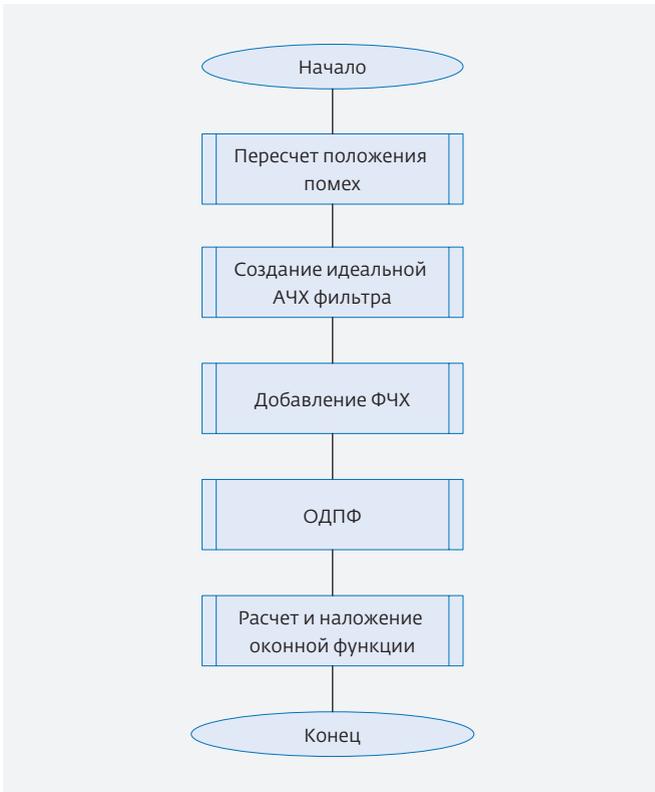


Рис.3. Блок-схема алгоритма синтеза импульсной характеристики фильтра по известному положению помех

составляет 2,048 МГц для C/A-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.

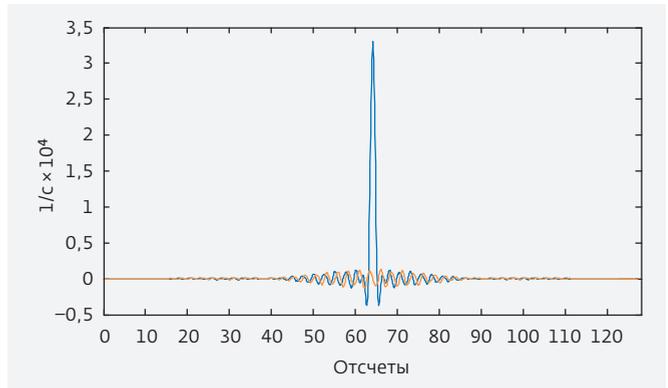


Рис.4. Комплексная импульсная характеристика фильтра

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 такой операции из одного массива получаются два, которые соответствуют действительной и мнимой частям импульсной характеристики (ИХ) фильтра. Предварительная импульсная характеристика получена при выполнении ОДПФ массивов. 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 (рис.4).

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

Результаты расчета шумовых ошибок

Шумовая ошибка	Без подавления	С подавлением
Шумовая ошибка по кодовым измерениям, м	1,3	1,69
Шумовая ошибка по фазовым измерениям, мм	0,43	1,08

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% (см. таблицу).

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.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

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, если использовалось 8-битное квантование, и при 10,24 дБ – если 1-битное. 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.

* * *

Проведенные эксперименты доказали работоспособность алгоритмов и высокую эффективность КИХ-фильтров на основе СБИС 1879ВЯ1Я при подавлении узкополосных помех в сигналах ГНСС. Как показало моделирование, несмотря на то, что при подавлении помех возрастают шумовые ошибки в связи с вырезанием части спектра, навигационный приемник можно использовать для высокоточных измерений, в частности, в режиме RTK.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Fabio Dovis.** GNSS Interference Threats and Countermeasures. – Artech House, 2015.
2. **Landry R.Jr., Calmettes V., Ducasse A.** 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. – www.module.ru/catalog/micro/sbis_1879vya1ya/
4. **Кашкаров В.А., Мушкаев С.В.** Организация параллельных вычислений в алгоритмах БПФ на процессоре NM6403. – Цифровая обработка сигналов, 2001.
5. **Бахурин С.А.** Спектральный анализ на ограниченном интервале времени. Оконные функции. – www.dsplib.ru/content/win/win.html

