

# ДВУХЭТАПНЫЙ АЛГОРИТМ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ И РЕЖЕКЦИИ МНОГОЧАСТОТНЫХ ПОМЕХ В НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ГЛОНАСС

**А. С. Кошкаров<sup>а</sup>**, канд. техн. наук

**В. А. Добриков<sup>а</sup>**, канд. техн. наук, доцент

<sup>а</sup>Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, РФ

**Постановка проблемы:** анализ разработок в области повышения помехоустойчивости навигационных приемников подвижных объектов и информационно-телематических систем показал, что в них не в полной мере используются возможности цифровой обработки сигналов. Особенно это проявляется при работе навигационных приемников в условиях помех. Соответственно, существует необходимость в разработке и применении новых алгоритмов обработки навигационных сигналов, использующих возможности цифровой обработки сигналов на различных этапах их преобразования в навигационной аппаратуре потребителя, в том числе на предкорреляционном. **Результаты:** показана возможность и предложен двухэтапный алгоритм детектирования и режекции многочастотных помех в навигационной аппаратуре потребителей ГЛОНАСС на основе использования цифровой предкорреляционной обработки сигналов. На первом этапе проводится контроль помеховой обстановки, построение частотной панорамы помех и автономное определение параметров гармоник многочастотных помех. На втором этапе осуществляется режекция протектированных составляющих многочастотных помех во временной области на основе использования банка коэффициентов цифрового фильтра. **Практическая значимость:** результаты исследований и сформулированные ограничения по уровню и ширине спектра режектируемых помех могут быть использованы при разработке и обосновании требований к перспективным образцам помехоустойчивых навигационных приемников. Приведенные результаты анализа искажений автокорреляционных функций навигационных сигналов системы ГЛОНАСС с частотным и кодовым разделением при режекции многочастотных помех определяют границы суммарной области режекции спектра помехи при использовании предложенного алгоритма.

**Ключевые слова** — навигационная аппаратура потребителей, помехоустойчивость, многочастотные помехи, обнаружение помех, режекция помех.

## Введение

Опыт эксплуатации глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) GPS и ГЛОНАСС, а также развертываемых ГНСС Beidou и Galileo показывает их высокую эффективность в качестве средств координатно-временного обеспечения потребителей [1] и дает мощный импульс к расширению диапазона их практических применений. В ближайшей перспективе ГНСС в комплексе с разрабатываемыми и вводимыми системами функциональных дополнений [2] призваны играть доминирующую роль в решении любых задач, относящихся к построению систем управления подвижными объектами, информационно-телематических систем, систем глобальной навигации и синхронизации.

Навигационная аппаратура потребителей (НАП) непосредственно обеспечивает выполнение потребителями навигационных определений по формируемому ГНСС радионавигационному полю. Высокий уровень интеграции НАП в системы управления объектов навигации задает особые требования к точности местоопределения по сигналам ГНСС и помехоустойчивости НАП. В то же время подверженность НАП воздействию преднамеренных и непреднамеренных помех делает ее уязвимой при использовании в качестве

основного средства навигации. Некоторые виды помех могут сделать НАП полностью неработоспособной, другие не позволяют решать навигационную задачу с заданной точностью, что в ряде случаев равносильно невыполнению НАП своего целевого предназначения. В настоящей статье рассмотрен двухэтапный алгоритм определения параметров и режекции многочастотных (полигармонических) помех и рассмотрены возникающие при его реализации искажения автокорреляционной функции сигналов ГНСС ГЛОНАСС.

## Анализ возможностей компенсации влияния помех на работу НАП

Помехи радиоэлектронным средствам принято разделять на непреднамеренные и преднамеренные [4]. Идентифицированные к настоящему времени искусственные непреднамеренные помехи в диапазонах частот спутниковой радионавигации создаются радиопомехами, гармониками телевизионных сигналов, сигналами запроса систем ближней навигации, гармониками УКВ-радиостанций, спутниковыми системами связи и радиолокационными станциями систем управления воздушным движением [5]. Эффективность борьбы с такими непреднамеренными помехами определяется мерами организационного харак-

тера и достигается сертификацией, регламентацией и контролем радиодиапазонов систем спутниковой навигации, а также допущениями и техническими решениями при разработке и проектировании НАП.

Наибольшую опасность для НАП представляют преднамеренные помехи, ограничивая или делая невозможными навигационные определения потребителя. Компенсация влияния преднамеренных помех возможна на различных этапах обработки навигационных сигналов и с использованием различных методов, но с различной эффективностью. При этом одними из наименее благоприятных для навигационных приемников ГЛОНАСС являются многочастотные (полигармонические) помехи с количеством гармоник от 20 до 30. Такие помехи, особенно с учетом возможности согласования спектральных составляющих, являются достаточно простыми для формирования и малоэнергозатратными при создании полей помех в локальных областях. Более сложным вариантом использования преднамеренных многочастотных помех является подмена навигационного поля (spoofing), используемого, в частности, в ГНСС ГЛОНАСС, путем имитации навигационных сигналов ГНСС с частотным разделением сигналов навигационных космических аппаратов (НКА) [6]. Таким образом, прием широкополосных навигационных сигналов на фоне многочастотных помех имеет широкое практическое применение.

Исходя из особенностей построения НАП как приемного устройства корреляционного типа, выделим два направления повышения его помехоустойчивости — использование предкорреляционных и посткорреляционных методов. К первой группе методов относятся временная и спектральная селекция, а также алгоритмы первичной обработки сигналов. Ко второй группе ме-

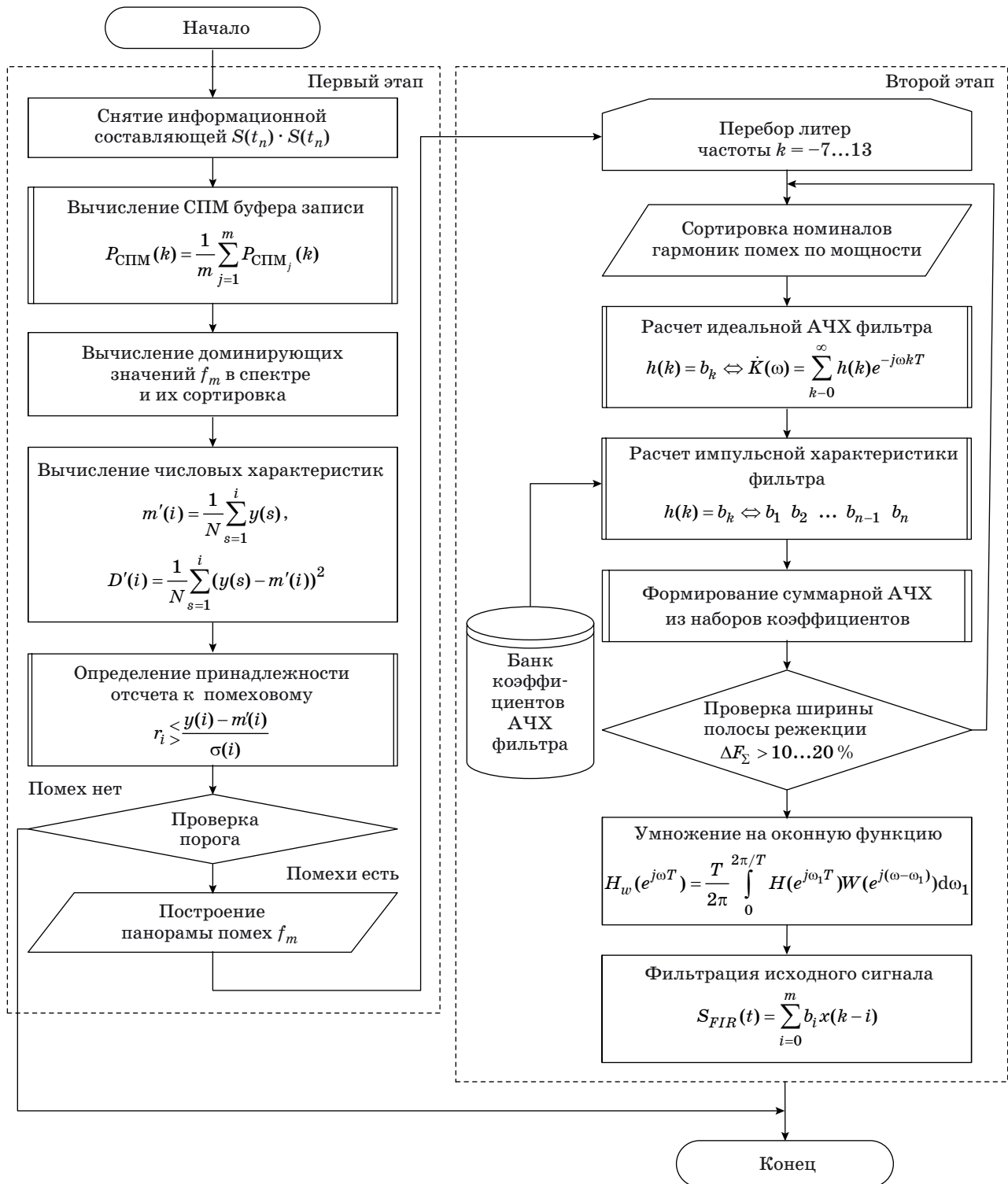
тодов относятся алгоритмы вторичной обработки сигналов. Общая характеристика обеих групп методов приведена в таблице.

Без учета использования адаптивных антенных решеток [7] наиболее эффективными методами повышения помехоустойчивости НАП являются методы спектральной и временной фильтрации. Использование при спектральной фильтрации нескольких операций ортогональных преобразований требует значительных вычислительных ресурсов. Другими проблемами при реализации методов спектральной фильтрации являются сложности расчета порога обнаружения помех, определения положения и числа удаляемых спектральных линий в спектре сигнала. Исходя из этого для реализации алгоритма режекции многочастотных помех будем использовать временную фильтрацию. Преимуществом такого метода является его техническая реализуемость и возможность адаптации в режиме реального времени к детектируемой помеховой обстановке. При этом использование в качестве устройств временной фильтрации фильтров с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтров) целесообразно как в техническом плане реализации, так и по потенциальным возможностям подавления многочастотных помех. Блоки, выполняющие такую операцию, могут иметь как программную, так и аппаратную реализацию.

Схема разработанного двухэтапного алгоритма детектирования и режекции во временной области многочастотных помех представлена на рис. 1. Работу синтезируемого алгоритма временной фильтрации (режекции) многочастотных помех целесообразно построить из двух последовательно выполняемых этапов: первый этап — определение параметров отдельных частотных составляющих помех (детектирование помех);

■ Методы повышения помехоустойчивости НАП ГНСС

Способ реализации	Достижимый уровень ослабления помехи, дБ	Возможный уровень реализации
<b>Предкорреляционные методы</b>		
Управление диаграммой направленности адаптивных антенных решеток	30–60	Аналого-цифровой
Спектральная фильтрация	20–30	Цифровой (программный)
Временная фильтрация	20–30	То же
Алгоритмы первичной обработки	10–15	– // –
<b>Посткорреляционные методы</b>		
Автономный контроль целостности	Внутренний	10–15
	Внешний	10–15
		Программный
		Аналого-цифровой, программный



■ **Рис. 1.** Схема двухэтапного алгоритма детектирования и режекции во временной области многочастотных (полигармонических) помех: СПМ — спектральная плотность мощности; АЧХ — амплитудно-частотная характеристика

второй этап — расчет параметров цифрового фильтра (режекция помех).

При работе алгоритма осуществляются непрерывный оперативный контроль помеховой об-

становки путем циклического исполнения первого этапа и, при необходимости, подключение в работу второго этапа для режекции протектированных гармоник помех.

### Детектирование многочастотных помех на основе построения частотной панорамы

Рассмотрим порядок действий для реализации этапа детектирования помех в частотной области на основе использования алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ). При работе с входным сигналом для перехода в спектральную область необходимо выполнить следующие действия.

**Шаг 1.** Выбор интервалов анализа и накопления при детектировании. Определяется количеством периодов накопления принимаемого сигнала и зависит от сложности помеховой обстановки. По результатам моделирования установлено, что накопление необходимо до 100 периодов навигационного сигнала при когерентном приеме и свыше 100 периодов — при некогерентном приеме.

**Шаг 2.** Гетеродинирование принятых отсчетов навигационного сигнала на нулевую частоту. Представление сигнала в комплексном виде.

**Шаг 3.** Накопление отсчетов синфазных и квадратурных составляющих входного навигационного сигнала на заданном интервале анализа и представление их к виду, который требуется для реализации БПФ.

**Шаг 4.** Вычисление спектральной плотности средней мощности на  $i$ -м периоде входного массива с использованием БПФ. В результате получаем спектральную плотность средней мощности периода входного массива в виде  $n$  комплексных чисел  $S_i = X_i + jY_i$  при  $i = 1, \dots, n$ .

**Шаг 5.** Вычисление модуля спектральной плотности  $|S_i^N| = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2}$ .

**Шаг 6.** Накопление модуля спектральной плотности на заданном числе  $N$  периодов входного сигнала  $|S_i^N| = \sum_{k=1}^N |S_{ik}|$ , где  $i = 1, \dots, n$ .

**Шаг 7.** Нормировка накопленного модуля спектральной плотности  $|S_i^N|$  к числу периодов накопления  $N$ .

**Шаг 8.** Аппроксимация спектра, в простейшем случае вычисление среднего по спектру. Сред-

нее необходимо для вычисления превышения уровней помех над средним уровнем по спектру. По величине этого превышения можно судить о наличии помех и их относительном уровне.

**Шаг 9.** Вычисление доминирующих значений в спектре и их сортировка по убыванию. Расчет значений частот, соответствующих найденным доминирующим значениям в спектре (гармоникам помех):

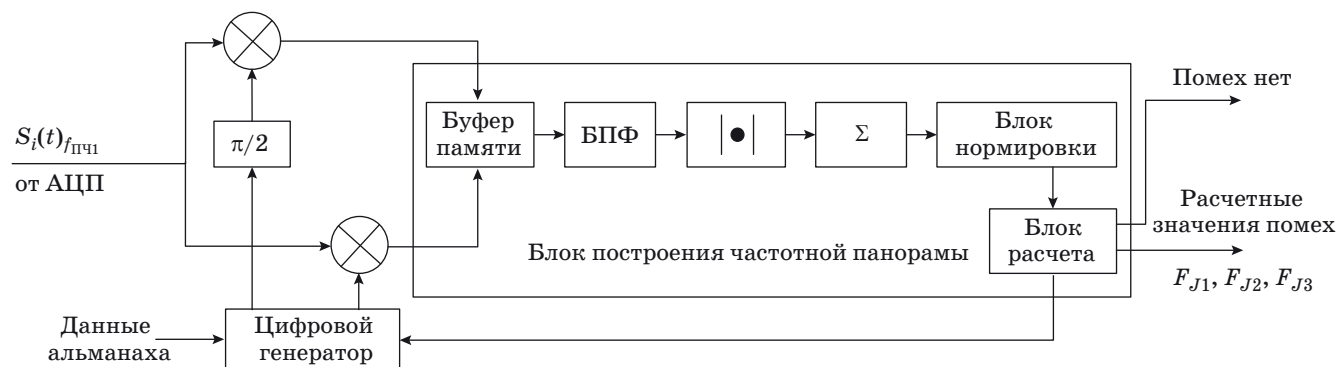
$$l_i = \frac{\Delta F}{n} i,$$

где  $\Delta F$  — ширина полосы анализируемых частот;  $n$  — порядок преобразования Фурье;  $i$  — смещение гармоники относительно центральной частоты в спектре.

Функциональная схема блока, реализующего этап детектирования помех в частотной области, представлена на рис. 2. Последовательная работа элементов блока позволяет сформировать исходные данные (номинальное значение частот и относительные мощности отдельных гармоник) для обеспечения работы блока режекции помех на основе КИХ-фильтра с АЧХ, зависящей от параметров протектированных помех.

### Моделирование работы алгоритма

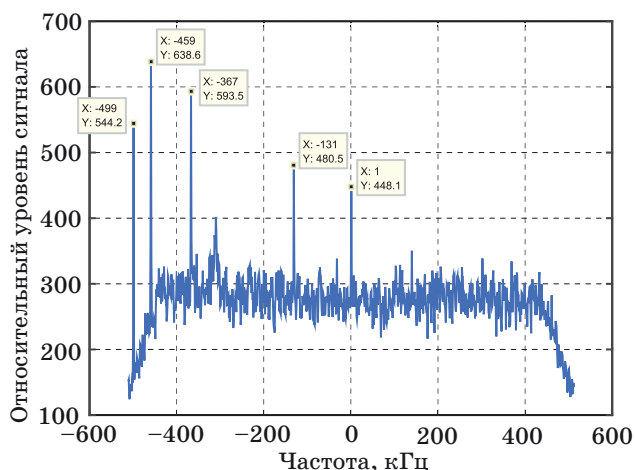
Для верификации полученных результатов было проведено имитационное моделирование работы предлагаемого двухэтапного алгоритма детектирования и режекции многочастотных помех во временной области. Для моделирования использовался программный навигационный приемник [8]. В интересах проведения исследования в нем были реализованы блоки детектирования и режекции помех, а также банк записей реальных навигационных сигналов. Для моделирования работы алгоритма использовался банк записей реальных сигналов, сделанных на промежуточной частоте радиочастотного тракта НАП. Работа блока моделировалась как для стандартных (СТ) навигационных сигналов ГНСС ГЛОНАСС



■ Рис. 2. Функциональная схема блока детектирования помех во временной области на основе частотной панорамы

с частотным разделением в диапазоне L1, так и для перспективных сигналов ГНСС ГЛОНАСС с кодовым разделением в диапазоне L3.

Результаты расчета панорамы помех для эфирного сигнала одного НКА системы ГЛОНАСС представлены на рис. 3, на котором отчетливо наблюдаются отдельные гармоники, которых не должно быть в спектре полезного широкополосного сигнала ГНСС. Причиной появления указанных гармоник в спектре является наличие многочастотной (из пяти отдельных составляющих) помехи на входе приемника. Результаты моделирования первого этапа работы алгоритма подтверждают возможность определения параметров гармоник составляющих помехи, таких как значение частоты и относительный уровень мощности.



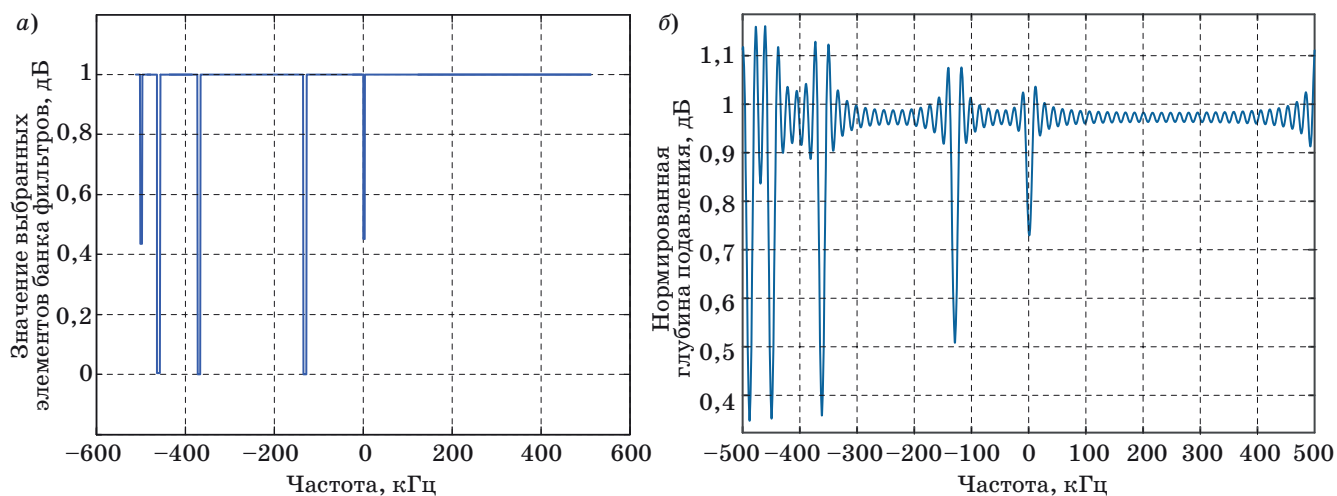
■ Рис. 3. Результаты определения параметров многочастотной помехи на этапе детектирования помех в виде частотной панорамы для реального СТ-сигнала одного литеры системы ГЛОНАСС

Результаты моделирования работы второго этапа алгоритма в виде поэтапного формирования требуемой АЧХ (по результатам работы детектора помех) при использовании банка коэффициентов фильтров показаны на рис. 4, а и б, на которых приведены идеальная АЧХ на основе пяти выбранных наборов коэффициентов детектирования помех и реальная АЧХ фильтра. Результаты моделирования второго этапа работы алгоритма показывают, что использование пяти различных наборов коэффициентов фильтров позволяет после перемножения во временной области получить фильтр с требуемой АЧХ для режекции многочастотной помехи.

Результаты использования синтезированного фильтра для случая воздействия полигармонической помехи показаны на рис. 5.

Из сравнения рис. 3 и 5, на которых показана СПМ до и после работы блоков детектирования и режекции, следует, что разработанный алгоритм позволяет проводить режекцию многочастотных (полигармонических) помех с использованием нерекурсивного КИХ-фильтра, синтезированного из наборов априорно рассчитанных коэффициентов по целеуказаниям, выдаваемым детектором помех.

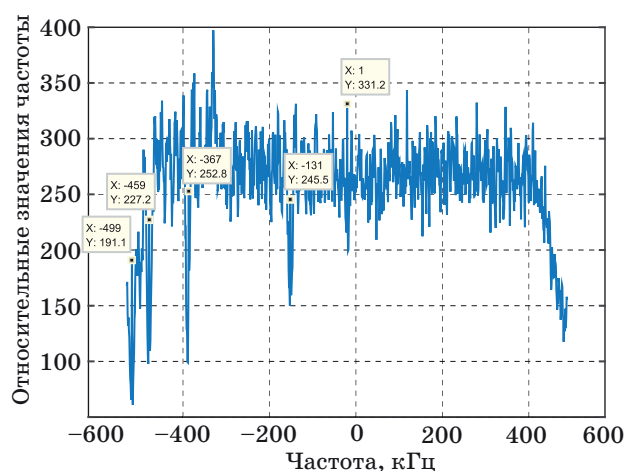
Вопросы влияния режекции помех на помехоустойчивость приема сложных сигналов рассматривались в работах [9–12]. В работе [10] предложен подход к оценке искажений корреляционной функции сложного сигнала с использованием весовых векторов, совпадающих с номерами элементарных фильтров. Применяя подход, аналогичный указанному, оценим степень влияния режекции многочастотных (полигармонических) помех на искажения формы корреляционной функции сигналов системы ГЛОНАСС. Для оценки степени искажений воспользуемся исходными параметрами сигналов ГНСС ГЛОНАСС



■ Рис. 4. Поэтапное формирование требуемой АЧХ фильтра: а — идеальная АЧХ на основе выбранных наборов коэффициентов детектирования помех; б — реальная АЧХ фильтра

с частотным разделением [3], являющихся на данный момент основными в структуре радиотерфейса. Результаты моделирования с использованием программного приемника при режекции различных участков спектра навигационных сигналов показаны на рис. 6, а и б, где по оси абсцисс отложена относительная задержка, по оси ординат — относительное значение пика автокорреляционной функции (АКФ).

Искажения АКФ при режекции в области высокой корреляции более существенны, чем при режекции по краям спектра. При увеличении ширины суммарной области режекции наблюдается существенное снижение высоты основного

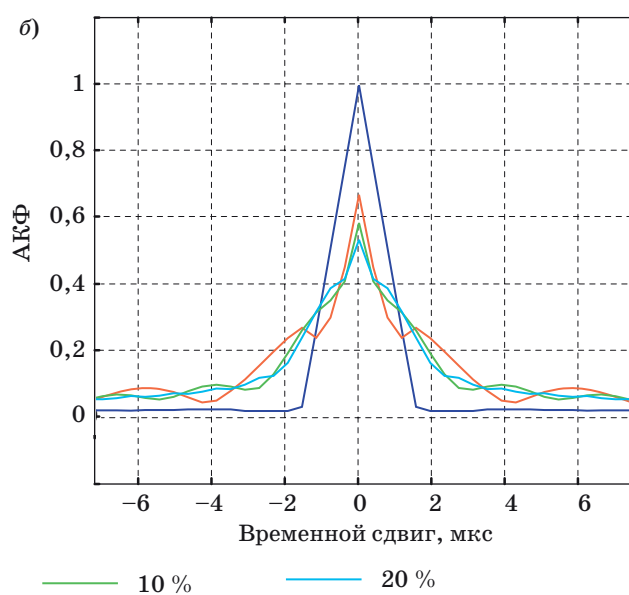
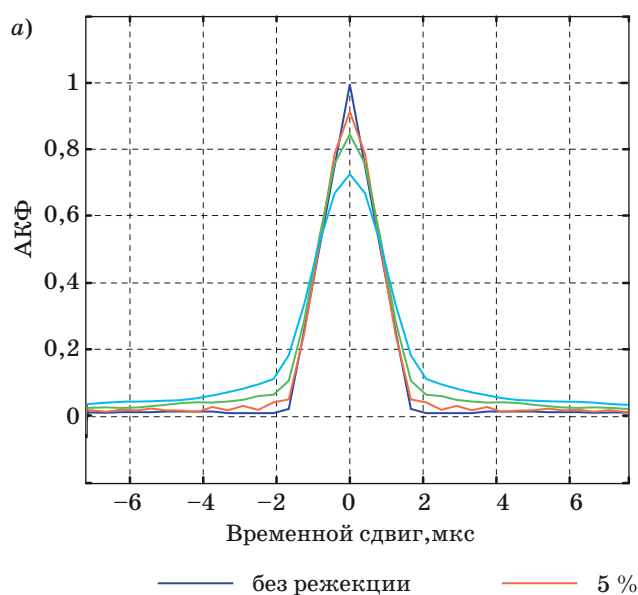


■ Рис. 5. Оценка СПМ для реального СТ-сигнала одного литеры ГЛОНАСС после работы двухэтапного алгоритма детектирования и режекции помех

пика и его расширение. Очевидно, что снижение основного пика АКФ при режекции части спектра не позволяет обнаружить навигационный сигнал с заданными характеристиками ложной тревоги и правильного обнаружения. Полученные результаты согласуются с известными результатами работ [10–12]. Из представленных графиков видно, что АКФ новых сигналов ГНСС ГЛОНАСС с кодовым разделением при малой ширине режекции (до 10 %) более устойчива как в уменьшении основного пика, так и в увеличении боковых лепестков. Это позволяет говорить о потенциально лучшей помехоустойчивости к непреднамеренным помехам. В результате моделирования работы алгоритма детектирования и режекции многочастотных помех были определены ограничения на общую ширину режекции полигармонических помех. Она составила от 10 до 20 % от общей ширины спектра навигационного сигнала в зависимости от типа сигнально-кодовой конструкции.

### Заключение

Использование блоков автономного детектирования и режекции помех позволяет реализовать помехоустойчивую НАП, которая необходима для решения широкого круга задач спутниковой навигации. В работе показано, что при использовании таких блоков в НАП возможно подавление нескольких десятков составляющих многочастотных помех (до 20–30) на глубину около 30 дБ с учетом ограничений по общей ширине режекции спектра навигационного сигнала. Однако при превышении этих ограничений происходит



■ Рис. 6. Искажения модуля АКФ сигналов системы ГЛОНАСС при режекции части спектра: а — в области высокой корреляции; б — по краям спектра

изменение временных параметров АКФ. Высота ее основного пика уменьшается, а его ширина увеличивается. Уменьшение высоты основного пика снижает потенциально достижимую помехоустойчивость используемой сигнально-кодовой конструкции, при этом новые сигналы с кодовым

разделением ГНСС ГЛОНАСС менее подвержены искажениям такого типа. Полученные результаты могут быть использованы при разработке и формировании требований к перспективным образцам помехоустойчивой НАП различного назначения.

## Литература

1. Текущее состояние и тенденции развития навигационных услуг и прикладных навигационных технологий на автомобильном транспорте: информационный бюллетень. — М.: ИАЦ КВНО, 2013. — 68 с.
2. Текущее состояние и тенденции развития навигационных услуг и прикладных навигационных технологий за рубежом. Реализация мероприятий по обеспечению совместимости и взаимодополняемости ГНСС: информационный бюллетень. — М.: ИАЦ КВНО, 2013. — 90 с.
3. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2 с открытым доступом и частотным разделением (редакция 5.10). — М.: Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения, 2008. — 74 с.
4. Куприянов А. И., Шустов Л. Н. Радиоэлектронная борьба. Основы теории. — М.: Вузовская книга, 2011. — 800 с.
5. Butsch F. GPS and GLONASS Radio Interference in Germany // Proc. of the 10<sup>th</sup> Intern. Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 1997). Kansas City, MO, 1997. P. 1427–1437.
6. Humphreys T. E., Ledvina B. M., Psiaki M. L., O'Hanlon B. W., Kintner Jr P. M. Assessing the Spoofing Threat: Development of a Portable GPS Civilian Spoofer // Proc. of the ION GNSS Intern. Technical Meeting of the Satellite Division. Savannah, GA, 2008. Vol. 55. P. 2314–2325.
7. Филиппов А. А., Бажин Д. А., Хлобыстов А. А. Повышение эффективности управления беспилотного летательного аппарата в условиях помех // Информационно-управляющие системы. 2014. № 6. С. 45–50.
8. Авдеев В. А., Кошкарров А. С., Коннов Е. В. Обнаружение помех в частотных диапазонах космических навигационных систем // Журнал радиоэлектроники. 2015. № 10. С. 2–21.
9. Немыкин А. А. Построение приемного тракта в условиях совместного действия импульсных и узкополосных помех // Цифровая обработка сигналов. 2011. № 1. С. 13–15.
10. Мальцев Г. Н., Харченко А. В., Гарагуля А. С. Границы повышения помехоустойчивости радиотехнических систем передачи информации при цифровой обработке сигналов с компенсацией помех // Информационно-управляющие системы. 2014. № 4. С. 111–116.
11. Борисов В. И., Зинчук В. М. и др. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией псевдослучайной последовательностью / под ред. В. И. Борисова. — М.: Радио и связь, 2003. — 640 с.
12. Тузов Г. И., Поставный В. Н., Мудров О. И. Исследование влияния режекции спектров сложных частотно-манипулированных сигналов на их корреляционные свойства // Радиотехника. 1988. № 10. С. 30–33.

UDC 621.396

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.2.88

### Two-Step Algorithm for Detection and Rejection of Multi-Frequency Interference in Navigation Receivers

Koshkarov A. S.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, koshkarof@rambler.ru

Dobrikov V. A.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, dwa33@mail.ru

<sup>a</sup>A. F. Mozhaysky Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia St., 197198, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Purpose:** The research in increasing the noise immunity of navigation receivers in vehicles and telematics systems does not fully use the modern possibilities of digital signal processing. This is particularly evident when navigation receivers operate in a noisy environment. Therefore, there is a need for the development and implementation of new algorithms for processing the navigation signals using digital signal processing capabilities at various stages of signal conversion in the user's navigational equipment, including the pre-correlation stage. **Results:** A two-step algorithm is proposed for the detection and rejection of multi-frequency interference in GLONASS navigational equipment through the use of pre-correlation digital signal processing. The first stage includes the noise condition control, the construction of a frequency panorama for the interference, and autonomous determination of the parameters of multi-frequency interference harmonics. At the second stage, the detected components of the multi-frequency interference in the time domain are rejected through the use of a bank of digital filter coefficients. **Practical relevance:** The obtained results and the

limitations formulated for the level and width of the rejected interference spectrum can be used for developing and substantiating the requirements for advanced models of noise-resistant navigation receivers. The results of analyzing the distortions of autocorrelation functions of GLONASS navigation system with FDMA or CDMA and rejected multi-frequency interference determine the total band of the interference rejection when using the proposed algorithm.

**Keywords** — GNSS Receiver, Noise Immunity, Multi-Frequency Interference, Radio Rejection.

### References

1. *Tekushchee sostoianie i tendentsii razvitiia navigatsionnykh uslug i prikladnykh navigatsionnykh tekhnologii na avtomobil'nom transporte* [Current Status and Development Trends of Navigation Services and Applications of Navigation Technologies in Road Transport]. Moscow, Informatсионno-analiticheskii tsentr koordinatno-vremennogo i navigatsionnogo obespecheniia Publ., 2013. 68 p. (In Russian).
2. *Tekushchee sostoianie i tendentsii razvitiia navigatsionnykh uslug i prikladnykh navigatsionnykh tekhnologii za rubezhom. Realizatsiia meropriiatiu po obespecheniiu sovremestnosti i vzaimodopolnnaemosti GNSS* [Current Status and Current Status and Trends in the Development of Navigation Services and Applications of Navigation Technology Abroad. Implementing Measures to Ensure the Compatibility and Interoperability of GNSS]. Moscow, Informatсионno-analiticheskii tsentr koordinatno-vremennogo i navigatsionnogo obespecheniia Publ., 2013. 90 p. (In Russian).
3. *Global'naiia navigatsionnaia sputnikovaia sistema GLONASS. Interfeisnyi kontrol'nyi dokument. Navigatsionnyi radiosignal v diapazonakh L1, L2 s otkrytym dostupom i chastotnym razdeleniem (redaktsiia 5.10)* [Global Navigation Satellite System. Interface Control Document. Navigation Radiosignal in Bands L1, L2 (Edition 5.1)]. Moscow, Rossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut kosmicheskogo priborostroeniia Publ., 2008. 74 p. (In Russian).
4. Kupriyanov A. I., Shustov L. N. *Radioelektronnaia bor'ba. Osnovy teorii* [Electronic Warfare. Basic Theory]. Moscow, Vuzovskaia kniga Publ., 2011. 800 p. (In Russian).
5. Butsch F. GPS and GLONASS Radio Interference in Germany. *Proc. of the 10th Intern. Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 1997)*, Kansas City, MO, 1997, pp. 1427–1437.
6. Humphreys T. E., Ledvina B. M., Psiaki M. L., O'Hanlon B. W., Kintner Jr P. M. Assessing the Spoofing Threat: Development of a Portable GPS Civilian Spoofer. *Proc. of the ION GNSS International Technical Meeting of the Satellite Division*. Savannah, GA, 2008, vol. 55, pp. 2314–2325.
7. Filippov A. A., Bazhin D. A., Khlobystov A. N. Improving Drone Aircraft Control Efficiency under Interference. *Informatсионno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2014, no. 6, pp. 45–50 (In Russian).
8. Avdeev V. A., Koshkarov A. S., Konnov E. V. Detecting of GNSS Bandwidth Interferences. *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2015, no. 10, pp. 2–21 (In Russian).
9. Nemykin A. A. Construction of the Receive Path in a Joint Action of Impulsive and Narrow-Band Interference. *Tsifrovaia obrabotka signalov*, 2011, no. 1, pp. 13–15 (In Russian).
10. Maltsev G. N., Harchenko A. V., Garagulya A. S. Limits of Radio Data Transmission Noise Immunity Improvement in Digital Signal Processing with Noise Compensation. *Informatсионno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2014, no. 4, pp. 111–116 (In Russian).
11. Borisov V. I., Zinchuk V. M., et al. *Pomekhozashchishchenost' sistem radiosvyazi s rasshireniem spektra signalov modulyatsiyey nesushchey pseudosluchaynoy posledovatel'nost'yu* [Radiocommunication System Immunity of Spread Spectrum Modulated Carrier Signals Pseudorandom Sequence]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 2003. 640 p. (In Russian).
12. Tuzov G. I., Postavnyj V. N., Mudrov O. I. Investigation of the Effect of Complex Spectra Rejection FSK Signals on their Correlation Properties. *Radiotekhnika*, 1988, no. 10, pp. 30–33 (In Russian).