

Методы подавления помех при приеме сигналов глобальных навигационных спутниковых систем на основе обработки сигналов во временной, частотной и частотно-временной областях

К. Ю. Коломенский

Национальный исследовательский центр телекоммуникаций им. М. И. Кривошеева,
Филиал в Санкт-Петербурге, Санкт-Петербург, Россия

✉ kolomenskiiky@nic-t.ru

Аннотация

Введение. На основе анализа многочисленных литературных источников предлагается вариант классификации методов подавления помех при приеме сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Представлены результаты аналитического обзора методов подавления помех ГНСС на базе обработки сигналов во временной, частотной и частотно-временной областях.

Цель работы. Краткий обзор методов с пояснением основных принципов и подходов при подавлении помех ГНСС на основе обработки сигналов во временной, частотной и частотно-временной областях.

Материалы и методы. Исследования и анализ рассматриваемых методов выполнены на основе материалов литературных источников 2000–2024 гг. (в основном на английском языке), которые отбирались в соответствии со следующими критериями: во-первых, применение методов подавления именно к помехам ГНСС; во-вторых, с теоретическим обоснованием и экспериментальным подтверждением эффективности предлагаемых методов. В статье рассмотрены методы борьбы с помехами ГНСС на основе обработки сигналов во временной, частотной и частотно-временной областях с применением адаптивных режекторных фильтров, спектрального анализа, кратковременного преобразования Фурье (Short-Time Fourier Transform – STFT), преобразования Вигнера–Вилля (Wigner–Ville Distribution – WVD) и его модификаций.

Результаты. Предложен вариант классификации методов подавления помех при приеме сигналов ГНСС. На основе этой классификации представлен обзор и основные результаты сравнительного анализа методов и алгоритмов борьбы с помехами, использующих обработку сигналов в одномерных и двумерных областях (временной, частотной и частотно-временной).

Заключение. Проведенный обзор и сравнительный анализ наиболее распространенных и эффективных методов борьбы с помехами ГНСС позволяет исследователям и разработчикам сократить время на изучение множества подходов к решению данной проблемы, предложенных на сегодняшний день в литературе. В следующей статье по этой теме будут рассмотрены методы подавления помех ГНСС с использованием вейвлет-преобразования (Wavelet Transform), а также обработки сигналов в пространственной и пространственно-временной областях.

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы, непреднамеренные и преднамеренные помехи, методы подавления помех, адаптивные режекторные фильтры, кратковременное преобразование Фурье, преобразование Вигнера–Вилля

Для цитирования: Коломенский К. Ю. Методы подавления помех при приеме сигналов глобальных навигационных спутниковых систем на основе обработки сигналов во временной, частотной и частотно-временной областях // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 4. С. 6–24.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-4-6-24

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 08.04.2025; принята к публикации после рецензирования 16.05.2025; опубликована онлайн 29.09.2025

GNSS Interference Mitigation Methods Based on Signal Processing in Time, Frequency and Time-Frequency Domains

Konstantin Yu. Kolomensky

The M. I. Krivosheev National Research Centre for Telecommunication,
St Petersburg Branch, St Petersburg, Russia

✉ kolomenskiiky@nic-t.ru

Abstract

Introduction. Following an analysis of numerous literature sources, the article proposes a classification for GNSS interference mitigation methods and carries out an analytical review of these methods. The results of an analytical review of GNSS interference mitigation methods with signal processing in the time, frequency and time-frequency domains are presented.

Aim. To carry out a brief review of methods explaining the basic principles and approaches for suppressing GNSS interference based on signal processing in the time, frequency and time-frequency domains.

Materials and methods. The analysis of the considered methods was based on the materials of literature sources published in 2000–2024 (mostly in English). The literature search was conducted based on the following criteria: firstly, the application of mitigation methods specifically to GNSS interference, and secondly, those with the theoretical justification and experimental confirmation of the effectiveness of the proposed methods. This article discusses methods for GNSS interference mitigation based on signal processing in the time, frequency and time-frequency domains using adaptive notch filters, spectral analysis, Short-Time Fourier Transform (STFT), Wigner–Ville Distribution (WVD), and its modifications.

Results. A classification for GNSS interference mitigation methods is proposed. On this basis, a comparative analysis of anti-interference methods and algorithms using signal processing in one-dimensional and two-dimensional domains (time, frequency and time-frequency) is carried out.

Conclusion. The conducted review and comparative analysis of the most common and effective methods of GNSS interference mitigation is intended to assist researchers and developers in reducing the time required to study the diversity of approaches to solving this problem proposed in the current literature. The next article on this topic will consider methods for GNSS interference mitigation using the Wavelet Transform method, as well as signal processing in the spatial and space-time domains.

Keywords: global navigation satellite systems, unintentional and intentional interference, GNSS interference mitigation, adaptive notch filters, Short-Time Fourier Transform, Wigner–Ville Distribution

For citation: Kolomensky K.Yu. GNSS Interference Mitigation Methods Based on Signal Processing in Time, Frequency and Time-Frequency Domains. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 4, pp. 6–24.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-4-6-24

Conflict of interest. The author declares no conflicts of interest.

Submitted 08.04.2025; accepted 16.05.2025; published online 29.09.2025

Введение. Данные, получаемые с помощью глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), используются для определения местоположения и синхронизации в работе многих критически важных, в том числе транспортных систем (например, для управления воздушными и морскими судами, автомобильным транспортом и т. д.). В связи с этим помехи ГНСС не только снижают достоверность и точность навигационной информации, но и представляют угрозу для здоровья и безопасности людей. Поэтому подавление или, по

крайней мере, снижение мешающего влияния помех ГНСС является предметом исследований и разработок во многих странах мира.

Непреднамеренные помехи обычно возникают в результате нелинейности радиопередатчиков других систем, которые работают в полосах частот, близких к диапазонам частот ГНСС. Преднамеренные помехи делятся на блокирующие (заградительные, jamming) и имитирующие реальные сигналы ГНСС (spoofing), имеющие целью исказить выдаваемую приемником навигационную информацию (координаты, скорость, время) [1–6].

Методы подавления помех при приеме сигналов глобальных навигационных спутниковых систем на основе обработки сигналов во временной, частотной и частотно-временной областях
GNSS Interference Mitigation Methods Based on Signal Processing
in Time, Frequency and Time-Frequency Domains

Блокирующие помехи могут намеренно создаваться с помощью устройств, способных передавать достаточно мощные сигналы в частотных диапазонах ГНСС. Такие устройства, называемые "устройствами персональной конфиденциальности" (Personal Privacy Devices – PPD), стали широко доступны в последние годы [3, 4]. Цель их применения – предотвратить возможность отслеживания местоположения со стороны менеджмента компаний, полиции или других лиц и организаций. Чаще всего такие устройства используются водителями транспортных средств и автограбителями. Нарушение работы приемников ГНСС в этом случае не должно осуществляться на больших расстояниях. Но иногда из-за низкого качества электронных компонентов, используемых в этих устройствах, мощность их излучения достигает уровня, при котором приемники ГНСС подвергаются серьезному мешающему воздействию на расстоянии нескольких километров [3, 4].

Для создания ложных сигналов ГНСС (спуфинга) нужна более серьезная аппаратура, формирующая или переизлучающая реальные сигналы ГНСС. Тем не менее в связи с открытым форматом сигналов ГНСС и прогрессом в области электронных технологий достаточно широкое распространение получили относительно недорогие устройства, формирующие поддельные сигналы ГНСС. Спуфинг известен как наиболее опасный вид преднамеренных помех, который заставляет приемники ГНСС выдавать ложную навигационную информацию, в то время как получатель может не подозревать о произведенной подмене [2, 3].

Проблема поддержания безопасности и функциональной надежности ГНСС, выявления и подавления помех при приеме сигналов этих систем приобретает все большее значение. Поэтому при проектировании систем с использованием навигационных данных, получаемых с помощью ГНСС, разработчикам необходимо учитывать важность применения адекватных методов обнаружения и подавления помех.

Тематика борьбы с помехами при приеме сигналов ГНСС настолько обширна, что не может быть освещена в рамках одной статьи. Вариант классификации помех при приеме сигналов ГНСС и обзор методов обнаружения различных

классов помех (непреднамеренных, блокирующих и имитационных) при приеме сигналов ГНСС был представлен автором в работах [5, 6]. В настоящей статье приводятся результаты аналитического обзора наиболее известных и широко освещенных в литературе методов подавления помех ГНСС на базе обработки сигналов во временной, частотной и частотно-временной областях. Следующую статью по этой теме планируется посвятить аналитическому обзору методов подавления помех ГНСС с использованием вейвлет-преобразования (Wavelet Transform), а также обработки сигналов в пространственной и пространственно-временной областях.

Классификация методов подавления помех, воздействующих на приемники ГНСС. Приведенная ниже классификация технических решений по борьбе с помехами ГНСС основана на данных анализа большого числа литературных источников. Необходимо заметить, что подходы к классификации методов подавления помех ГНСС в разных источниках несколько различаются. Поэтому предлагаемую ниже классификацию следует рассматривать лишь как один из возможных вариантов.

Главным классификационным признаком методов подавления помех ГНСС, по-видимому, наиболее целесообразно определить область обработки, в которой проводится разделение сигналов на аутентичные и мешающие. Соответственно, среди методов подавления помех ГНСС следует выделить те, которые основаны на обработке сигналов во временной, частотной, частотно-временной, пространственной и пространственно-временной областях.

Конечно, в рамках предлагаемой классификации имеются подгруппы методов, которые определяются методикой построения и параметрами предлагаемых алгоритмов подавления помех, например в зависимости от используемого типа преобразования сигналов из временной области в другую, от применяемых методов выделения помех на базе статистических или адаптивных подходов и т. д.

В качестве еще одного классификационного признака может использоваться вид помех, против которого направлено применение того или иного метода. Соответственно, можно выделить методы, направленные на борьбу с импульсными

или непрерывными помехами, узкополосными или широкополосными, непреднамеренными или преднамеренными помехами. Однако этот признак может использоваться только в качестве вторичного, так как существуют методы, которые позволяют бороться с помехами различных типов. Например, методы на основе пространственной селекции сигналов подавляют любой мешающий сигнал, если он поступает с направления, которое не соответствует направлению прихода аутентичных спутниковых сигналов.

В соответствии с высказанными соображениями относительно классификации методов подавления помех в данной статье рассматриваются следующие группы методов борьбы с помехами ГНСС (рис. 1).

Методы подавления помех ГНСС во временной области (Time Domain – TD) не требуют преобразования входного сигнала в другую область для последующей обработки [7–23]. Они характеризуются удалением из принятого сигнала временных фрагментов, пораженных помехой, и применяются, в основном, для борьбы с импульсными помехами. Отдельную подгруппу составляют методы борьбы со специфическими помехами, формат которых известен – так называемые методы последовательного исключения помех (Successive Interference Cancellation – SIC). К этой же группе методов чаще всего относят использование адаптивных режекторных фильтров (АРФ) (Adaptive Notch Filters – ANF), позволяющих подавлять узко-

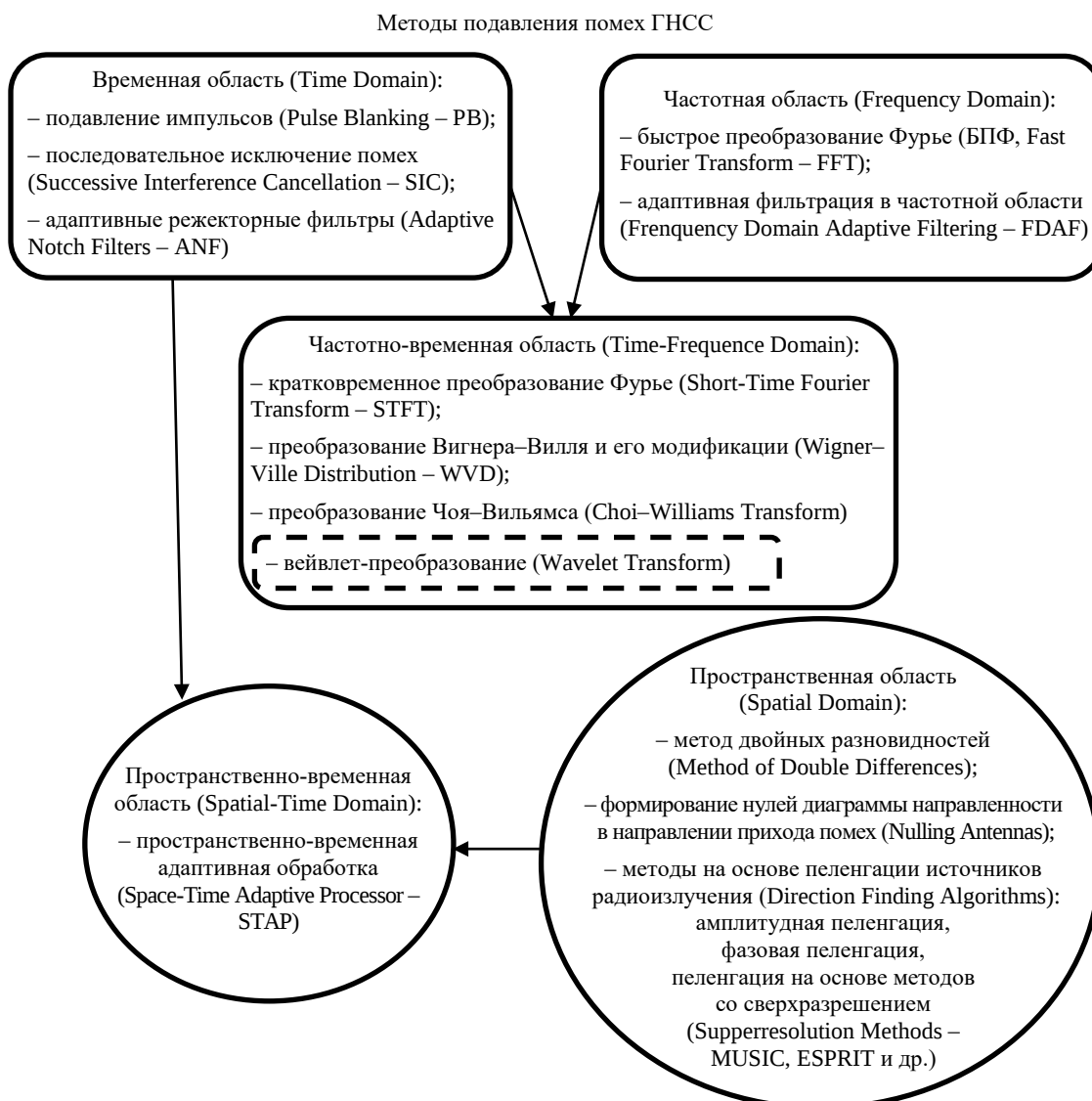


Рис. 1. Предлагаемый вариант классификации методов подавления помех при приеме сигналов ГНСС

Fig. 1. Proposed classification of GNSS interference mitigation methods

полосные помехи. Отнесение АРФ к методам, использующим обработку сигналов во временной области, связано с некоторой неоднозначностью. С одной стороны, применение АРФ не требует преобразования сигналов из временной области в другую, с другой – подавление помеховых составляющих происходит в частотной области. В данной статье принят наиболее распространенный подход, основанный на главном классификационном признаке – области обработки сигналов (в данном случае это временная область), хотя в некоторых источниках встречается упоминание АРФ как метода, применяемого в частотной области.

Методы подавления помех ГНСС в частотной области (Frequency Domain – FD) основаны на использовании спектрального анализа принятого сигнала с применением различных модификаций быстрого преобразования Фурье (БПФ) (Fast Fourier Transform – FFT) [24–30]. После обнаружения пораженных помехами участков спектра производится "вырезание" этих участков с помощью цифровых фильтров и последующее восстановление сигнала методом обратного БПФ.

Методы, реализуемые в частотно-временной области (Time-Frequency Domain – TFD), за счет применения различных преобразований формируют представление сигналов в плоскости "время–частота", в которой выполняется процедура поиска и удаления составляющих, пораженных помехами [31–44]. Частотно-временное представление можно получить применив одно из множества описанных в литературе преобразований, каждое из которых имеет свои преимущества и недостатки. В статье кратко рассматриваются наиболее распространенные преобразования.

Другие группы методов подавления помех ГНСС планируется рассмотреть в следующей статье по данной тематике.

Один из разделов будет посвящен анализу *методов на основе вейвлет-преобразования*. Хотя их также можно отнести к методам, реализуемым в частотно-временной области, они все же обладают определенной спецификой и заслуживают отдельного рассмотрения.

Методы подавления помех ГНСС в пространственной области (Spatial Domain – SD) характеризуются использованием антенной си-

стемы, состоящей из нескольких элементов (минимум двух). Наиболее простой и дешевый метод этого типа – так называемый метод двойных разностей, использующий 2 или несколько типовых приемников ГНСС. Однако чаще применяются многоэлементные адаптивные антенные решетки (ААР) различной конфигурации. Методы с использованием ААР основаны либо на формировании диаграммы направленности с глубокими нулями в направлениях на источники помех, либо на пеленгации сигналов и построении пространственного спектра (пеленгационного рельефа) сигналов, принимаемых от всех источников радиоизлучения на входе приемника ГНСС. Последние называются пеленгацией со сверхразрешением (Superresolution Methods – MUSIC, ESPRIT и мн. др.).

Методы, реализуемые в пространственно-временной области (Spatial-Time Domain – STD), являются развитием подходов на основе пространственной обработки сигналов. Они базируются на использовании пространственно-временного адаптивного процессора (Space-Time Adaptive Processor – STAP), изменяющего свои характеристики в зависимости от изменения помеховой обстановки во времени.

У всех перечисленных методов есть свои плюсы и минусы. Некоторые методы очень эффективны, но достаточно сложны для реализации в аппаратуре и требуют значительных вычислительных затрат. С другой стороны, самые простые и экономически эффективные методы часто не могут противостоять современным устройствам, создающим блокирующие помехи или ложные сигналы ГНСС.

Методы, использующие обработку сигналов во временной области. *Подавление импульсных помех.* Среди различных способов борьбы с импульсными помехами особое внимание уделяется методу подавления импульсов (Pulse Blanking – PB) [7–10]. Основной принцип метода PB заключается в обнулении выборок на выходе аналого-цифрового преобразователя (АЦП), как только они превышают по амплитуде пороговое значение, которое определяется на основе ожидаемой мощности теплового шума.

Большинство работ, посвященных методу PB, не учитывают эффекты квантования сигналов. Экспериментальные результаты представ-

ляются с использованием АЦП с разрядностью не менее 8 бит [9], в то время как большинство современных приемников ГНСС для снижения аппаратных издержек работают с ограниченным количеством бит АЦП (1–3 бит). В отличие от других работ теоретическая модель, описанная в [10], учитывает не только количество бит, используемых для квантования, но и влияние автоматической регулировки усиления. Разработанная теория используется для выбора оптимальных параметров, которые минимизируют остаточные потери после подавления импульсов.

Последовательное исключение помех. Описывая методы, использующие обработку сигналов во временной области, нельзя не упомянуть метод "последовательного подавления помех" (Successive Interference Cancellation – SIC) [11, 12]. Этот метод применим для борьбы только с одним специфическим видом помех, связанным с излучением сигналов наземных передатчиков, называемых "pseudolites" (сокращение от "псевдоспутники"). Такие системы были предложены для дополнения ГНСС в условиях ограниченной видимости спутников, а также с целью существенного повышения точности получения навигационной информации, например при посадке воздушных судов в аэропортах. Одной из сложностей при их использовании является так называемая near-far problem ("проблема ближний-дальний"), когда в непосредственной близости от наземного псевдоспутника его сигнал может быть на порядки сильнее сигналов ГНСС. Это не позволяет типовому приемнику ГНСС обнаруживать сигналы от обычных навигационных спутников. Метод SIC помогает отследить слабые спутниковые сигналы в присутствии близлежащего псевдоспутника. Ранее этот метод был предложен для борьбы с многолучевым отражением сигналов и для решения проблем множественного доступа в системах беспроводной связи [12].

Метод SIC наиболее часто применяется в приемниках ГНСС, основанных на SDR-платформах, в которых несколько каналов могут работать параллельно. Каждый канал определяет параметры наиболее сильной составляющей из смеси принимаемых сигналов. По оценкам этих параметров наиболее сильная составляющая восстанавливается и вычитается

из смеси сигналов на входе приемника. На следующем этапе приемник снова выделяет самый сильный сигнал из оставшихся и вновь вычитает его из входного сигнала. Процесс прекращается, когда отношение сигнал/шум падает ниже порогового значения, которое на несколько децибел превышает номинальный уровень аутентичных спутниковых сигналов [11].

В качестве примера использования метода SIC приведем результаты лабораторного моделирования с помощью MATLAB и эксперимента в реальных условиях, проведенного в районе аэродрома Райт-Паттерсон, штат Огайо (США) [11].

В процессе моделирования имитировались сигналы семи реальных спутников с номинальным уровнем мощности (17...20 дБ ниже уровня теплового шума) и сигнал псевдоспутника с уровнем мощности, превышающим уровень теплового шума на 10 дБ.

При проведении натурального эксперимента на приемной стороне сигнал поступал на полосовой фильтр с частотой 2 МГц и смеситель с промежуточной частотой 1.25 МГц. Затем с помощью 8-разрядного АЦП производилась дискретизация сигналов с частотой 5 МГц. Для получения экспериментальных данных использовались сигналы реальных спутников GPS. К ним применялись как обычные алгоритмы, так и алгоритмы с использованием SIC.

В табл. 1 представлены значения отношения сигнал/шум на выходе коррелятора, полученные в ходе моделирования и натурального эксперимента.

Результаты применения метода SIC сравниваются с результатами использования стандартного алгоритма обработки сигналов GPS-приемником. Анализ полученных данных показывает, что в присутствии сильных сигналов псевдоспутников применение метода SIC позволяет увеличить отношение сигнал/шум на выходе коррелятора для сигналов реальных спутников на 15...18 дБ и тем самым надежно выделить навигационную информацию из реальных сигналов ГНСС.

Использование АРФ. Среди различных методов подавления помех ГНСС, не требующих преобразования сигналов в частотную, частотно-временную или другие области, привлекательным решением с точки зрения относительно невысокой сложности и малых вычисли-

Табл. 1. Результаты моделирования и натурного эксперимента с целью оценки эффективности применения метода SIC
Tab. 1. Results of modeling and field experiment to evaluate the SIC method effectiveness

Данные моделирования			Экспериментальные данные		
Номер спутника	Отношение сигнал/шум, дБ		Номер спутника	Отношение сигнал/шум, дБ	
	Без метода SIC	С методом SIC		Без метода SIC	С методом SIC
5	–7.7	8	3	–9	8.4
6	–7	8.8	14	–8.8	8.2
10	–8.2	7	16	–10.2	7.6
13	–9	7.7	18	–11.3	8.3
22	–8.7	7.6	19	–12	6.9
24	–8	7.8	25	–9.5	8.4
30	–6.4	8.3	31	–7.4	8.1

тельных затрат является АРФ [13–23]. Методы подавления помех ГНСС с помощью АРФ предназначены для борьбы с узкополосными помехами и основываются на режекции пораженных участков спектра.

Наиболее часто используется реализация АРФ на основе фильтров с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ) (Infinite Impulse Response – IIR). БИХ-фильтр проще в реализации по сравнению с соответствующим фильтром с конечной импульсной характеристикой (КИХ) (Finite Impulse Response – FIR) для той же полосы пропускания. Этот момент оказывается решающим, хотя КИХ-фильтр абсолютно устойчив и имеет линейную фазочастотную характеристику. АРФ может быть реализован в различных формах, например таких, как решетчатая БИХ-структура (Lattice Structure IIR Filter) [13, 15, 21], билинейный БИХ-фильтр (Bilinear IIR Filter) и БИХ-фильтр с ограниченными полюсами и нулями (Adaptive IIR Notch Filters with Constrained Poles and Zeros) [15].

Поскольку частота помехи, как правило, неизвестна и может изменяться во времени, в состав АРФ входит адаптивный модуль, позволяющий оценить центральную частоту и ширину полосы мешающего излучения. Многие исследования продемонстрировали эффективность применения АРФ при подавлении тональных и узкополосных помех [15, 18, 22, 23].

Типовой АРФ содержит многоотводную линию задержки, весовой сумматор и адаптивный модуль, который оценивает параметры помехи и рассчитывает весовые коэффициенты. Выходной сигнал АРФ формируется как взвешенная сумма задержанных на различное

время копий входного сигнала. Сущность обработки сигналов в АРФ состоит в таком подборе весовых коэффициентов, чтобы полезный сигнал был принят в наилучших условиях, а помеха была максимально подавлена.

В общем случае в условиях, когда параметры помех неизвестны, для расчета и подстройки весовых коэффициентов используются различные алгоритмы адаптации. В частности, в литературе предлагаются алгоритмы простого градиента (Plain Gradient – PG) [15], рекурсивной ошибки предсказания (Recursive Prediction Error – RPE), решетчатые алгоритмы (Lattice Gradient Algorithm – LGA и Simplified Lattice Algorithm – SLA) [21] и др. Общий для всех этих алгоритмов подход заключается в том, что весовые коэффициенты вычисляются посредством нескольких итераций.

В качестве примера приведем двухполосный АРФ, предложенный в [14] для подавления непрерывной узкополосной помехи. Его передаточная функция задается следующим выражением:

$$H(z) = \frac{1 - 2 \operatorname{Re}\{z_0\} z^{-1} + |z_0|^2 z^{-2}}{1 - 2k_\alpha \operatorname{Re}\{z_0\} z^{-1} + k_\alpha^2 |z_0|^2 z^{-2}},$$

где z_0 – ноль на z -плоскости, соответствующий частоте помехи; $\operatorname{Re}\{z_0\}$ – вещественная часть комплексного параметра z_0 . Вещественный параметр $0 < k_\alpha < 1$, называемый коэффициентом сжатия полюсов, определяет ширину полосы задержки режекторного фильтра. Чем ближе значение k_α к единице, тем меньше вырезаемая часть частотного спектра, а следовательно, и влияние АРФ на полезный сигнал.

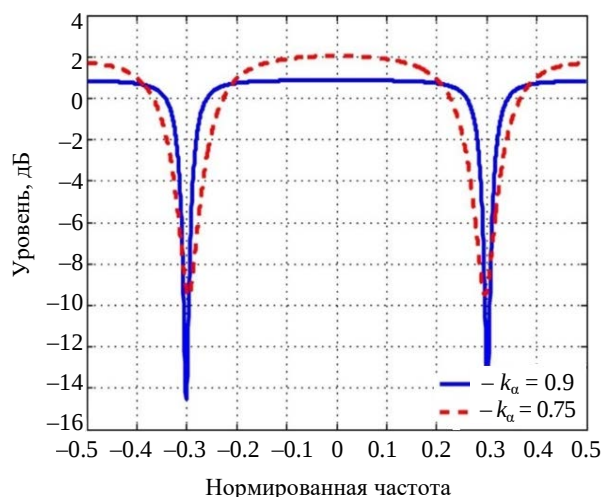


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика АРФ второго порядка при двух значениях коэффициента сжатия полюсов [14]

Fig. 2. Two-pole notch filter transfer function for two different contraction factors [14]

Однако по соображениям стабильности БИХ-фильтра значения k_α нельзя выбирать сколь угодно близко к единице. К тому же, необходимо учитывать реальную полосу частот, занимаемую помехой. На рис. 2 приведена амплитудно-частотная характеристика такого АРФ при двух значениях коэффициента сжатия полюсов.

Методы подавления помех ГНСС, использующие обработку сигналов во временной области, достаточно просты в реализации, но в общем случае не столь эффективны, как более сложные методы с применением преобразования сигналов в частотную, частотно-временную и другие области.

Методы, использующие обработку сигналов в частотной области. В отличие от методов, использующих обработку сигналов во временной области, для применения спектрального анализа необходимо преобразовать принимаемый сигнал в частотную область. Для этого традиционно используется БПФ, чаще всего – его дискретная реализация [24–30].

Полученные оценки спектральной плотности мощности принятого сигнала сравниваются с некоторым пороговым значением, которое определяется в соответствии с выбранной статистической моделью и заданным критерием обнаружения помех. Если составляющие в какой-либо части спектра превышают этот порог, соответствующие частотные компоненты обнуляются с последующим восстановлением оставшейся части

сигнала во временной области с помощью обратного преобразования Фурье [24–28]. Этот метод называется адаптивной фильтрацией в частотной области (Frequency-Domain Adaptive Filtering – FDAF) [26–30] или подавлением помех в частотной области (Frequency-Domain Interference Suppression – FDIS) [25]. Он позволяет быстро и эффективно устранять помехи с различными характеристиками и способен бороться с несколькими помехами одновременно [25, 26]. Важно, однако, чтобы суммарная полоса частот помех была существенно меньше полосы сигнала ГНСС, в противном случае возможно заметное искажение полезного сигнала. Таким образом, метод FDAF целесообразно применять для борьбы с тональными и относительно узкополосными помехами.

Если частота дискретизации не кратна частоте узкополосной помехи, разрывы на границах временной выборки, используемой в качестве исходных данных для БПФ, будут расширять получаемый частотный спектр. Этот эффект называется "утечкой спектра". Один из способов уменьшить влияние разрывов, возникающих при взятии отсчетов для БПФ, – использование "оконных функций". Оконные функции уменьшают эффект утечки спектра, но вызывают некоторую деформацию сигналов после восстановления во временной области.

Один из относительно простых способов преодоления этих эффектов – использование двух параллельно включенных модулей FDAF (Dual-FDAF). При этом один из них работает с задержкой на половину длительности выборки [26, 29].

В качестве примера оценки эффективности описанных ранее методов подавления помех ГНСС приведем результаты экспериментов с приемом сигналов систем GPS и Galileo с различными видами модуляции при воздействии на стандартный приемник ГНСС помех, излучаемых упомянутыми ранее типовыми устройствами защиты конфиденциальности (Privacy Protection Devices – PPD) [29]. Хотя в большинстве стран использование этих устройств запрещено законом, их можно легко и недорого приобрести через Интернет. Три таких устройства, использованных для проведения экспериментов, показаны на рис. 3. PPD 1 дороже, чем два других PPD, но имеет автономный аккумулятор и поддерживает излучение помех для нескольких систем (GSM,

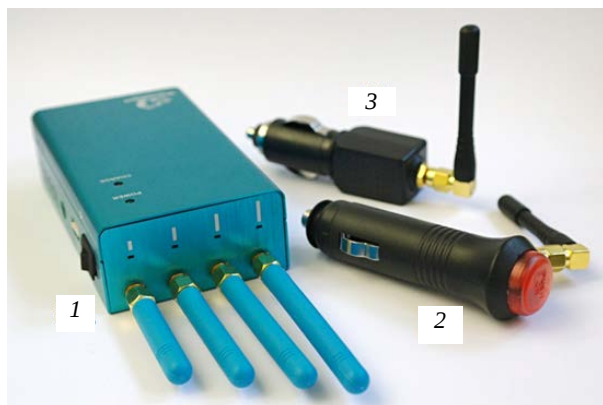


Рис. 3. Устройства защиты конфиденциальности [29]

Fig. 3. Three privacy protection devices used in the study [29]

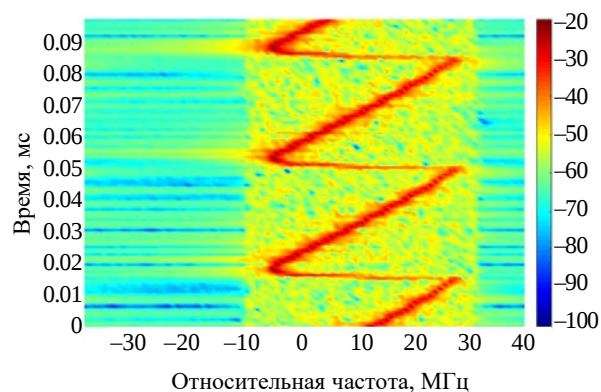


Рис. 4. Сигнал, излучаемый PPD #2 [29]

Fig. 4. Signal emitted by PPD #2 [29]

Wi-Fi, все типы ГНСС). Более дешевые устройства PPD 2 и 3 предназначены для подключения к гнезду прикуривателя в автомобиле и создают помехи только в диапазоне частот GPS L1. На рис. 4 показан сигнал PPD #2 в частотно-

временной плоскости. Видно, что PPD #2 передает непрерывный сигнал с линейной частотной модуляцией (chirp interference).

На рис. 5 приведены результаты экспериментов по приему сигналов ГНСС при мешающем воздействии помех, создаваемых PPD #2, в случае применения трех ранее описанных методов подавления помех ГНСС: АРФ, FDAF и Dual-FDAF.

На графиках представлены зависимости снижения отношения сигнал/шум C/N_0 от мощности помех. Анализ графиков показывает, что без применения методов подавления помех наблюдается монотонное снижение отношения C/N_0 с ростом мощности помех. В то же время использование рассматриваемых методов подавления помех позволяет поддерживать качество приема сигналов ГНСС на приемлемом уровне даже при существенных значениях мощности помехового воздействия.

Методы с использованием представления сигналов в частотно-временной области. Подавление помех ГНСС основано на обнаружении помеховых составляющих и удалении их из принимаемого радиоизлучения с минимально возможным повреждением структуры полезного сигнала. С этой целью часто оказывается полезным представление принимаемого излучения в некоторой области (Transformed Domain – TD), отличной от классических областей обработки сигналов, – временной или частотной. Смысл представления сигналов в дру-

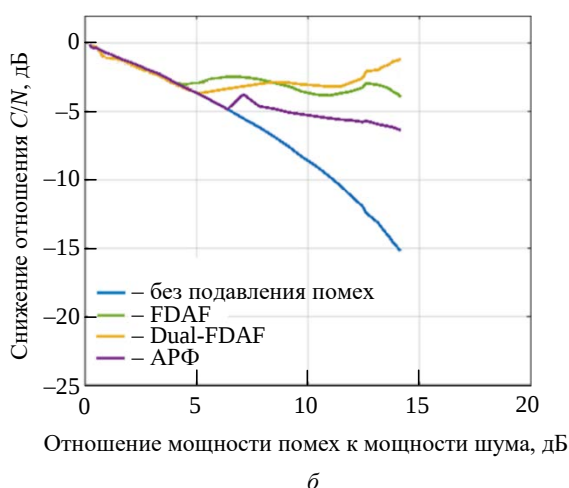
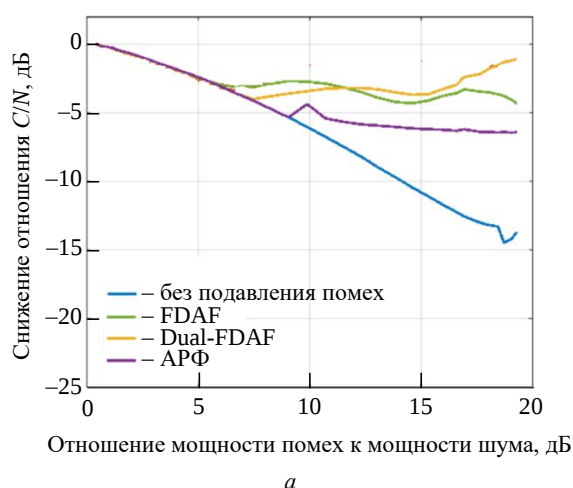


Рис. 5. Результаты экспериментов при мешающем воздействии помех от устройства PPD #2: а – при приеме сигналов GPS L1 C/A с модуляцией BPSK(1); б – при приеме сигналов Galileo E1 B/C с модуляцией BOC(1, 1) [29]

Fig. 5. Experimental results under the interfering influence of PPD #2 signal: а – when receiving signals of GPS L1 C/A signals with BPSK(1) modulation; б – when receiving signals of Galileo E1 B/C signals with BOC(1, 1) modulation [29]

гой – обычно двумерной – области состоит в том, чтобы эффективнее разделить полезные и помеховые составляющие, используя дополнительную информацию. Выбор наилучшего ТД-преобразования зависит от природы источника помех, от выбранного метода их устранения и от допустимой сложности его реализации.

В литературе чаще всего описываются методы подавления помех, использующие представление сигналов в двумерных областях. Они включают анализ входного сигнала с помощью того или иного преобразования с построением соответствующего профиля в двумерной области (например, частотно-временной), идентификацию помех в этой области на основе определенного критерия, исключение отсчетов, относящихся к помехе, и восстановление сигнала во временной области с помощью обратного преобразования.

Рассмотрим методы с использованием преобразований, обеспечивающих представление принимаемого сигнала в частотно-временной области (Time-Frequency Domain – TFD).

Классический и часто используемый метод анализа нестационарных сигналов в частотно-временной области базируется на кратковременном преобразовании Фурье (Short-Time Fourier Transform – STFT). Применение STFT в целях анализа сигналов и подавления помех ГНСС с помощью представления сигналов в частотно-временной области широко освещено в [31–44].

Преобразование STFT основано на том, что анализируемый сигнал умножается на оконную функцию, отличную от нуля только в течение некоторого короткого промежутка времени. Затем выполняется преобразование Фурье каждого сегмента по мере сдвига окна вдоль оси времени, в результате чего получается двумерное представление сигнала. В случае непрерывного времени кратковременное преобразование Фурье определяется следующим образом [31–33, 36–39, 41]:

$$\text{STFT}(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} y_a(\tau) h(\tau - t) e^{-i\omega\tau} d\tau,$$

где ω – угловая частота; τ – временной сдвиг; $y_a(\tau)$ – аналитическое представление принимаемого сигнала; $h(\tau)$ – оконная функция, вещественная и четная с центром в нуле (к часто

используемым оконным функциям относятся окна Хэмминга, Ханнинга, Чебышева, Кайзера и Гаусса). $\text{STFT}(t, \omega)$ – линейная функция времени t и угловой частоты ω , зависящая от типа и параметров выбранной оконной функции, отличается от классического преобразования Фурье только наличием множителя $h(\tau - t)$.

В результате применения кратковременного преобразования Фурье получается комплексная величина, и ее визуальное представление достигается возведением в квадрат. В итоге получается квадратичное частотно-временное представление QTFD (Quadratic Time-Frequency Distribution), называемое спектрограммой [31, 33, 36, 39–41]:

$$\text{SPEC}(t, \omega) = |\text{STFT}(t, \omega)|^2.$$

Анализ сигналов с помощью построения спектрограммы удобен в силу его линейности и относительной простоты. Однако ему присущ внутренний недостаток, связанный с применением оконной функции. Он проявляется в том, что одновременно получить хорошее разрешение по времени и частоте не удастся.

На рис. 6 показан нестационарный сигнал, состоящий из трех гауссовских компонент с тремя различными частотами и двумя разными положениями по времени. Предполагается, что сигнал представлен с помощью 250 временных отсчетов, а значения амплитуд и частот нормированы и не выходят за пределы интервалов $[-2, 2]$ и $[0, 0.5]$ соответственно.

На рис. 7 показаны проекции спектрограмм этого сигнала на плоскость "время–частота",

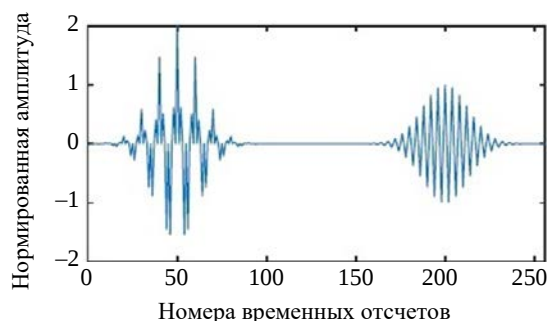


Рис. 6. Нестационарный сигнал, состоящий из трех гауссовских компонент [39]

Fig. 6. Non-stationary signal consisting of three Gaussian components [39]

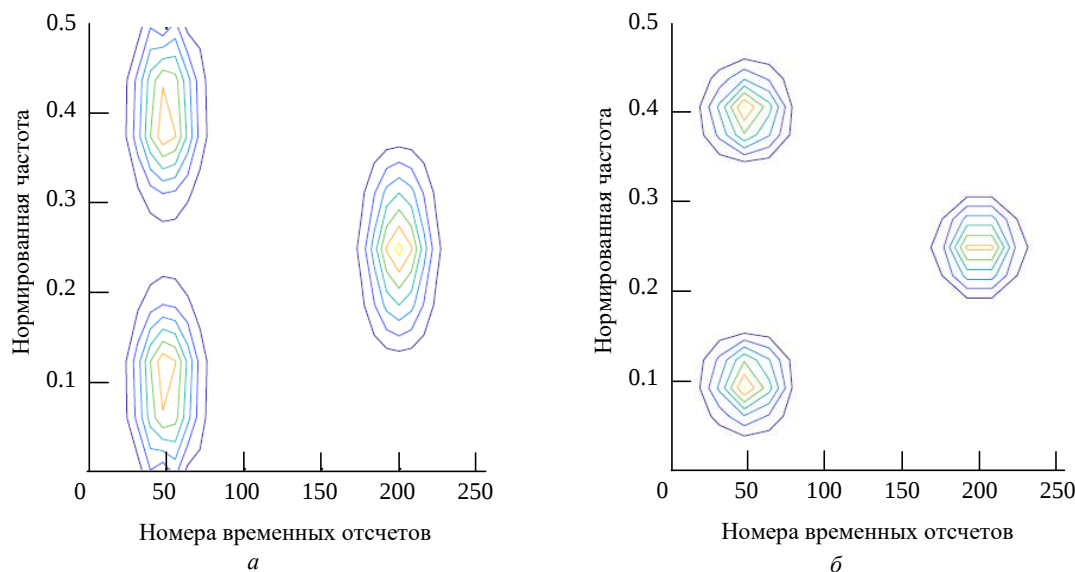


Рис. 7. Проекция спектрограмм сигнала, представленного на рис. 6, на плоскость "время–частота", полученные с применением окна Хэмминга при размере окна: a – из 15 отсчетов; b – из 31 отсчета [39]

Fig. 7. Spectrogram projection of the signal shown in Fig. 6 onto the time–frequency plane obtained using the Hamming window with a window size: a – of 15 samples; b – of 31 samples [39]

включающие 3 пика в точках, соответствующих реальным значениям частот и временного положения исходного сигнала [39]. Спектрограммы получены при использовании окна Хэмминга, состоящего из 15 (рис. 7, a) и 31 (рис. 7, b) отсчета.

Видно, что пики спектрограммы имеют конечную ширину по обеим осям частотно-временной плоскости. Попытка улучшить разрешение по частоте за счет увеличения размера "окна" приводит к ухудшению разрешения по времени и наоборот. В результате выбор окна для представления сигнала с помощью STFT связан с необходимостью принятия компромиссного решения, какой из двух параметров – частота или время – важнее в каждом конкретном случае.

Чтобы избежать этой проблемы, для перехода в частотно-временную область часто используют преобразование Вигнера–Вилля (Wigner–Ville Distribution – WVD) [31–33, 37–41]. В этом случае преобразование Фурье применяется к мгновенной функции автокорреляции $R(t, \tau)$ анализируемого сигнала:

$$\begin{aligned} \text{WVD}(t, \omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R(t, \tau) e^{-i\omega\tau} d\tau = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} y_a\left(t + \frac{\tau}{2}\right) y_a^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-i\omega\tau} d\tau, \end{aligned}$$

где ω – угловая частота; символ $*$ обозначает комплексное сопряжение.

Как видно из этого выражения, преобразование WVD является квадратичным. Оно обладает рядом полезных свойств, которые позволяют оценить распределение энергии сигнала в частотно-временной области с хорошим разрешением по времени и частоте. Кроме того, преобразование любого сигнала с помощью WVD всегда вещественно и дает представление сигнала в частотно-временной области с ограничением по времени и по частоте [40, 41]:

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} \text{WVD}(t, \omega) d\omega &= |y_a(t)|^2; \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \text{WVD}(t, \omega) dt &= |Y_a(\omega)|^2, \end{aligned}$$

где $Y_a(\omega)$ – спектр анализируемого сигнала. Соответственно, суммируя WVD по всем частотам, можно получить мгновенную энергию сигнала в конкретный момент времени, а сумма по всей временной оси дает мощность сигнала на конкретной частоте.

Несмотря на то, что WVD обладает многими полезными свойствами и обеспечивает почти оптимальное разрешение по времени и частоте среди всех методов преобразования сигналов в частотно-временную область, его главный недостаток заключается в нежелательных перекрестных составляющих [38–41]. Поскольку это пре-

образование является квадратичным, а следовательно, нелинейным, то WVD суммы сигналов не равно сумме WVD каждого из этих сигналов из-за наличия перекрестных составляющих в формуле квадрата суммы. В результате, если сигнал содержит хотя бы 2 компоненты, его WVD в частотно-временной области содержит ложные составляющие, которые возникают посередине между аутентичными пиками, адекватно характеризующими распределение энергии сигнала. Эти ложные пики не имеют физического смысла, но могут превышать аутентичные пики по уровню в 2 раза.

В качестве примера на рис. 8, а показан результат преобразования WVD для нестационарного сигнала, представленного на рис. 6, а соответствующая проекция на плоскость "время–частота" изображена на рис. 8, б. Видно, что, с одной стороны, преобразование Вигнера–Вилля обладает лучшим разрешением по времени и частоте по сравнению со спектрограммой, а с другой – между аутентичными пиками спектрограммы возникают 3 ложные перекрестные составляющие, превышающие по уровню реальные компоненты.

Разумным подходом к частичному ослаблению перекрестных составляющих является введение в WVD функции низкочастотной фильтрации. Это приводит к так называемому псевдопреобразованию Вигнера–Вилля (Pseudo Wigner–Ville Distribution – PWVD) [33, 39–41]. Оно

включает достаточно простой метод подавления перекрестных составляющих между компонентами, достаточно удаленными друг от друга во времени, и записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{PWVD}(t, \omega) &= \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) y_a\left(t + \frac{\tau}{2}\right) y_a^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-i\omega\tau} d\tau = \\ &= \text{WVD}(t, f) * H(f), \end{aligned}$$

где $h(\tau)$ – оконная функция, симметричная относительно $\tau = 0$; $H(f)$ – преобразование Фурье от оконной функции $h(\tau)$; символ $*$ в данном случае обозначает операцию свертки. Таким образом, PWVD представляет собой свертку WVD и спектра оконной функции, что уменьшает количество перекрестных составляющих и их амплитуду с помощью сглаживания.

Ослабление перекрестных составляющих при использовании PWVD достигается за счет потери некоторых положительных свойств преобразования Вигнера–Вилля, в частности, за счет снижения разрешения по частоте. Чтобы уменьшить влияние перекрестных составляющих и в то же время сохранить полезные свойства WVD, вводится другой метод, использующий дополнительное окно для сглаживания по времени независимо от сглаживания по частоте. Такое преобразование носит назва-

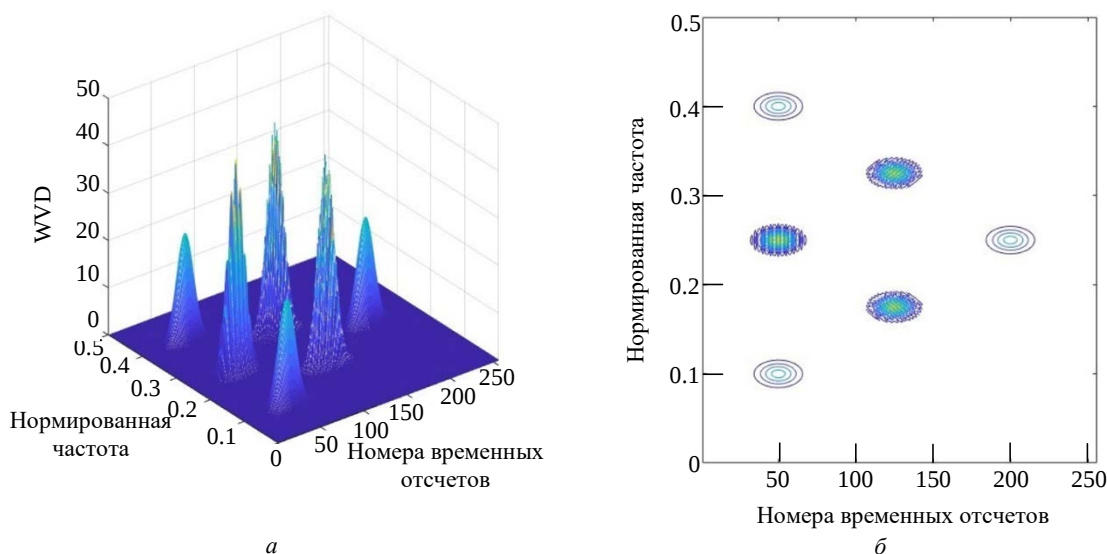


Рис. 8. Преобразование сигнала, представленного на рис. 6, в частотно-временную область с помощью преобразования Вигнера–Вилля (а) и его проекция на плоскость "время–частота" (б) [39]

Fig. 8. Transformation of the signal shown in Fig. 6 into the time-frequency domain using the Wigner–Ville transform (a) and its projection onto the time–frequency plane (b) [39]

ние сглаженного псевдораспределения Вигнера–Вилля (Smoothed Pseudo Wigner–Ville Distribution – SPWVD) [33, 39–41]. Очевидно, однако, что его применение требует дополнительных вычислительных ресурсов.

В качестве примера оценки эффективности методов подавления помех ГНСС с использованием представления сигналов в частотно-временной области приведем результаты эксперимента, описанного в [32]. При проведении эксперимента использовался реальный сигнал GPS L1 C/A. Для моделирования интерференции в виде периодически повторяющихся импульсов с линейной частотной модуляцией (chirp interference) использовался генератор помех, управляемый компьютером. Основные параметры эксперимента приведены в табл. 2.

Табл. 2. Параметры эксперимента для оценки эффективности методов подавления помех ГНСС с использованием представления сигналов в частотно-временной области [32]

Tab. 2. Experimental parameters for evaluating the effectiveness of GNSS interference mitigation methods using the signal representation in the time-frequency domain [32]

Параметр	Значение
Отношение мощности сигнала к мощности шума (C/N_0)	42 дБ-Гц
Отношение мощности помехи к мощности шума (JNR)	2 дБ
Частота дискретизации	20 МГц
Промежуточная частота	4 МГц
Начальная частота помехи	2.5 МГц
Период изменения частоты помехи	1 мс
Скорость изменения частоты помехи	14 МГц/с

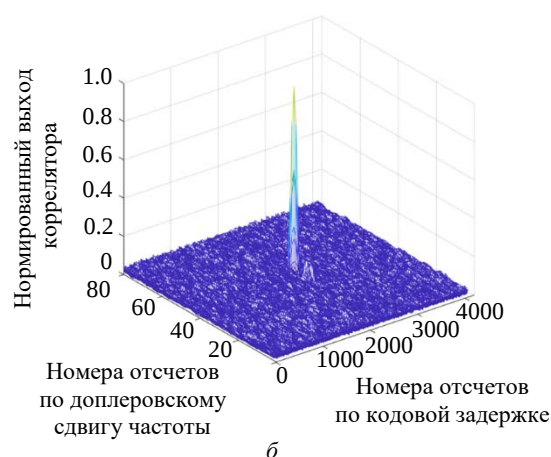
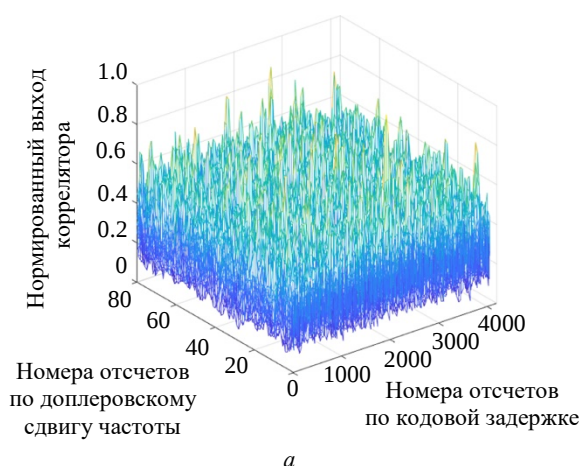


Рис. 9. Результаты эксперимента по оценке эффективности методов подавления помех ГНСС:
а – двумерное представление сигнала на выходе коррелятора до подавления помех;
б – то же представление сигнала после подавления помех [32]

Fig. 9. Results of an experiment to evaluate the effectiveness of GNSS interference mitigation methods:
а – two-dimensional representation of the signal at the correlator output before interference suppression,
б – the same signal representation after interference mitigation [32]

На рис. 9 показаны результаты эксперимента в виде двумерного представления сигналов на выходе коррелятора стандартного приемника ГНСС до и после подавления помех с использованием преобразования сигналов в частотно-временную область.

Вид сигнала, получаемого на выходе коррелятора, демонстрирует очевидный эффект от подавления помех. В отсутствие подавления помех сигнал GPS L1 C/A полностью скрыт мешающими составляющими (рис. 9, а). В то же время после подавления помех явно выраженный сигнальный пик (рис. 9, б) позволяет с достаточной точностью определить кодовую задержку и доплеровский сдвиг частоты, необходимые для получения навигационной информации.

В литературе описаны различные варианты дальнейшего совершенствования перечисленных методов с использованием преобразования анализируемых сигналов в частотно-временную область. В рамках настоящей статьи ограничимся лишь кратким описанием наиболее известных из предлагаемых методов и ссылками на соответствующие литературные источники.

1. *Переназначенное сглаженное псевдораспределение Вигнера–Вилля (Reassigned Smoothed Pseudo Wigner–Ville Distribution – RSPWVD)* [33, 37, 41] отличается от SPWVD тем, что с учетом неравномерности двумерной спектрограммы в пределах скользящего окна по времени и по частоте усреднение осуществляется с соответствующими весами.

ющим переносом расчетной точки (t, ω) в плоскости "время–частота" из геометрического центра двумерного окна в его "центр тяжести" (t', ω'). Такой подход позволяет более точно оценить локальное распределение энергии анализируемого сигнала в районе расчетной точки [41]. RSPWVD позволяет практически устранить влияние перекрестных составляющих и в то же время обладает хорошим разрешением как во временной, так и в частотной областях.

2. Множественное кратковременное преобразование Фурье (Multiple Short-Time Fourier Transform – MSTFT) использует различные по длительности скользящие окна, чтобы улучшить разрешение STFT. Это достигается за счет некоторого увеличения вычислительной нагрузки. В [36] предлагается методика поиска близкого к оптимальному набора окон, при котором MSTFT дает высокую точность обнаружения блокирующих помех. Это обеспечивает возможность эффективного применения режекторного фильтра для подавления помех ГНСС с минимальным удалением части полезного сигнала.

3. Сглаженное псевдораспределение Вигнера–Хафа (Smoothed Pseudo-Wigner–Hough Transform – SPWHT) предложено использовать для обнаружения и подавления помех ГНСС в [39]. Суть предложения состоит в совместном применении ранее рассмотренного сглаженного псевдораспределения Вигнера–Вилля (SPWVD) и преобразования Хафа (Hough Transform). Последнее представляет собой вычислительный алгоритм, применяемый для параметрической идентификации геометрических элементов растрового изображения. Преобразование Хафа используется при цифровой обработке изображений и предназначено для поиска объектов, принадлежащих определенному классу фигур. Его обычно применяют для выделения объектов определенной формы в пространстве изображения. Это, в частности, позволяет свести сложный процесс обнаружения в пространстве изображений к относительно простой задаче обнаружения локальных пиков в пространстве параметров. Классический алгоритм Хафа связан с идентификацией прямых линий в изображении. Наиболее распространенный вид блокирующих помех ГНСС – излучение мешающих сигналов с линейной частотной модуляцией. Поскольку проекции их спектрограммы на

плоскость "время–частота" представляют собой контуры, близкие к прямым линиям, то для их идентификации можно использовать алгоритм Хафа. В [39] анализируется применение алгоритма Хафа в комбинации с рассмотренными ранее методами WVD, PWVD, SPWVD и делается вывод, что SPWHT заметно повышает эффективность подавления помех ГНСС по сравнению с традиционными подходами, основанными на частотно-временном анализе.

4. Преобразование Чоя–Вильямса (Choi–Williams Transform), как и все преобразования на базе распределения Вигнера, относится к классу нелинейных преобразований Коэна [42, 43]. Все преобразования из класса Коэна, с одной стороны, обладают хорошими частотно-временными свойствами по сравнению с другими преобразованиями, а с другой – при анализе многокомпонентных сигналов имеют ложные перекрестные составляющие. Последние приводят к искажению истинного распределения энергии по времени и частоте. В выражение для преобразования Чоя–Вильямса входит управляющий параметр $\sigma > 0$, который является коэффициентом масштабирования. Если σ стремится к бесконечности, то преобразование Чоя–Вильямса трансформируется в преобразование Вигнера–Вилля. При эффективном выборе управляющего параметра удастся существенно снизить влияние перекрестных составляющих и в то же время сохранить положительные свойства данного класса преобразований, обеспечивающих, в том числе, хорошее разрешение по времени и частоте [43].

Заключение. Многообразие предлагаемых в литературе методов борьбы с помехами при приеме сигналов ГНСС может вызвать существенные затруднения при выборе наиболее эффективного и в то же время адекватного с экономической точки зрения метода обеспечения помехоустойчивости в каждом конкретном случае применения оборудования ГНСС. Приведенные в статье результаты аналитического обзора наиболее распространенных и эффективных методов борьбы с помехами ГНСС призваны помочь исследователям и разработчикам сократить время на изучение множества подходов к решению данной проблемы, предложенных на сегодняшний день в литературе.

Выбор наиболее подходящего метода зависит от условий и целей каждой отдельной разработки. В значительной мере этот выбор определяется допустимой сложностью применяемого радиооборудования и вычислительных средств. Очевидно, что в случае разработки специализированных корпоративных и военных приложений, для которых не столь сильны ограничения по сложности и стоимости разработки, возможно применение эффективных и затратных методов обеспечения помехоустойчивости аппаратуры ГНСС, которые не доступны для использования на массовом рынке.

Изобилие публикаций по теме статьи свидетельствует о том, что проблема борьбы с помехами ГНСС не только сохраняет свою актуальность, но и в определенной мере обостряется в связи с целым рядом обстоятельств. Так ускоренное внедрение новых спутниковых технологий, включая гибридные сети связи 5G, 5GA и 6G, использующие спутниковый сегмент [44, 45], приводит к повышению плотности занятия радиочастотного спектра и повышению вероятности оказания не преднамеренного мешающего воздействия на

другие спутниковые системы, в том числе ГНСС. В то же время быстрое развитие радиотехнологий и вычислительной техники приводит к повышению доступности и удешевлению аппаратуры и программного обеспечения для изобретения новых, достаточно сложных способов преднамеренного воздействия на приемники ГНСС.

В связи с этим очевидно, что исследования в области защиты от непреднамеренных и имитационных помех ГНСС будут продолжаться и далее, а это в свою очередь приведет к появлению все новых и новых методов обнаружения и подавления помех при приеме сигналов спутниковых навигационных систем.

В литературных источниках предлагается множество подходов к подавлению помех ГНСС, не рассмотренных в данной статье. В частности, в следующей статье планируется привести результаты аналитического обзора эффективных методов подавления помех ГНСС на базе вейвлет-преобразования и методов, использующих обработку сигналов в пространственной и пространственно-временной областях.

Список литературы

1. Sharifi-Tehrani O., Ghasemi M. H. A Review on GNSS-Threat Detection and Mitigation Techniques // Cloud Computing and Data Science. 2022. Vol. 4, № 2. P. 161–185.
doi: 10.37256/ccds.4320231678
2. Ioannides R. T., Pany T., Gibbons G. Known Vulnerabilities of Global Navigation Satellite Systems, Status and Potential Mitigation Techniques // Proc. of the IEEE. 2016. Vol. 104, № 6. P. 1174–1194.
doi: 10.1109/JPROC.2016.2535898
3. Dosis F., Di Torino P. GNSS Interference, Threats and Countermeasures. Norwood: Artech House, 2015. 220 p.
4. Protecting GNSS Receivers from Jamming and Interference / G. X. Gao, M. Sgammini, M. Lu, N. Kubo // Proc. of the IEEE. 2016. Vol. 104, № 6. P. 1327–1338.
doi: 10.1109/JPROC.2016.2525938
5. Коломенский К. Ю. Методы обнаружения помех при приеме сигналов глобальных навигационных систем. Ч. I // Электросвязь. 2024. № 10. С. 44–51.
doi: 10.34832/ELSV.2024.59.10.007
6. Коломенский К. Ю. Методы обнаружения помех при приеме сигналов глобальных навигационных систем. Ч. II // Электросвязь. 2024. № 11. С. 39–48.
doi: 10.34832/ELSV.2024.60.11.006
7. Suppression of pulsed interference through blanking / C. Hegarty, A. J. Van Dierendonck, D. Bobyn, M. Tran, T. Kim, J. Grabowski // Proc. of the IAIN World Congress and the Annual Meeting of the Institute of Navigation AM/ION, San Diego, United States, 26–28 June 2000. Institute of Navigation, 2000. P. 399–408.

8. Improved analytical models of SNIR degradation in presence of pulsed signals and impact of code-pulse synchrony / F. Soualle, M. Cattenoz, C. Zecha, K. Giger // Proc. 5th European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing, Toulouse, France, Dec. 2011. Institute Aéronautique et Spatial (IAS), 2011. P. 1–18.
9. Grabowski J., Hegarty C. Characterization of L5 receiver performance using digital pulse blanking // Proc. of the 15th Intern. Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 2002), Portland, United States, 24–27 Sept. 2002. Institute of Navigation, 2002. P. 1630–1635.
10. Borio D., Cano E. Optimal global navigation satellite system pulse blanking in the presence of signal quantization // IET Signal Process. 2013. Vol. 7, № 5. P. 400–410.
doi: 10.1049/iet-spr.2012.0199
11. Application of successive interference cancellation to the GPS pseudolite near-far problem / P. H. Madhani, P. Axelrad, K. Krumvieda, J. Thomas // IEEE Trans. Aerospace Electronic Systems. 2003. Vol. 39, № 2. P. 481–488.
doi: 10.1109/TAES.2003.1207260
12. Razzaque A. B. A., Baiocchi A. Analysis of Status Update in Wireless Networks with Successive Interference Cancellation // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2024. P. 1–16. URL: <https://arxiv.org/pdf/2409.00277> (дата обращения 07.08.2025)
13. Chien Y. Design of GPS Anti-Jamming Systems Using Adaptive Notch Filters // IEEE Systems J. 2015. Vol. 9, № 2. P. 451–460.
doi: 10.1109/JSYST.2013.2283753

14. Borio D., Camoriano L., Presti L. Two-Pole and Multi-Pole Notch Filters: A Computationally Effective Solution for GNSS Interference Detection and Mitigation // *IEEE System J.* 2008. Vol. 2, № 1. P. 38–47.
doi: 10.1109/JSYST.2007.914780
15. Xiao Y., Takeshita Y., Shida K. Tracking properties of a gradient-based second-order adaptive IIR notch filter with constrained poles and zeros // *IEEE Transactions Signal Processing.* 2002. Vol. 50, № 4. P. 878–888.
doi: 10.1109/78.992134
16. El Gebali A., Landry R. J. Comparing the Performances between Adaptive Notch Filter Direct and Lattice Forms Structures for Mitigation Jamming Signals // *Communications and Network.* 2022. Vol. 14, № 3. P. 91–107.
doi: 10.4236/cn.2022.143007
17. Borio D., Gioia C. GNSS interference mitigation: A measurement and position domain assessment // *Navigation: J. of The Institute of Navigation.* 2021. Vol. 68, № 5. P. 93–114.
doi: 10.1002/navi.391
18. Musumeci L., Curran J. T., Dosis F. A Comparative Analysis of Adaptive Notch Filtering and Wavelet Mitigation against Jammers Interference // *Navigation: J. of The Institute of Navigation.* 2016. Vol. 63, № 4. P. 533–550.
doi: 10.1002/NAVI.167
19. Borio D. A multi-state notch filter for GNSS jamming mitigation // *Intern. Conf. on Localization and GNSS, Helsinki, Finland, 24–26 June 2014. IEEE, 2014.* P. 1–6.
doi: 10.1109/ICL-GNSS.2014.6934175
20. Borio D. A Loop analysis of adaptive notch filters // *IET Signal Processing.* 2016. Vol. 10, № 6. P. 659–669.
doi: 10.1049/iet-spr.2015.0310
21. A new lattice-based adaptive notch filtering algorithm with improved mean update term / S. Nakamura, S. Koshita, M. Abe, M. Kawamata // *Asia-Pacific Signal and Information Proce. Association Annual Summit and Conf., Kaohsiung, Taiwan, 29 Oct.–01 Nov. 2013. IEEE, 2013.* P. 1–4.
doi: 10.1109/APSIPA.2013.6694169
22. Khan N. A., Aguado L. E. Adaptive Notch Filter based Interference Characterization and Mitigation for GNSS Receivers // *Proc. of the 37th Intern. Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Baltimore, Maryland, 16–20 Sept. 2024. Institute of Navigation, 2024.* P. 2984–2994.
doi: 10.33012/2024.19819
23. Borio D., O'Driscoll C., Fortuny J. Fast and Flexible: Tracking and Mitigating a Jamming Signal with an Adaptive Notch Filter // *Inside GNSS.* 2014. Vol. 9, P. 67–73.
24. Yousif T., Blunt P. Interference Mitigation for GNSS Receivers Using FFT Excision Filtering Implemented on an FPGA // *Eng.* 2022. Vol. 3, № 4. P. 439–466.
doi: 10.3390/eng3040032
25. A Single-Chip Narrow-Band Frequency-Domain Excisor for a Global Positioning System (GPS) Receiver / P. T. Capozza, B. J. Holland, T. M. Hopkinson, R. L. Landrau // *IEEE J. of Solid-State Circuits.* 2000. Vol. 35, № 3. P. 401–411.
doi: 10.1109/4.826823
26. HDDM Hardware Evaluation for Robust Interference Mitigation / F. Garzia, J. R. Van der Merwe, A. Rügamer, S. Urquijo, W. Felber // *Sensors.* 2020. Vol. 20, iss. 22. P. 1–24.
doi: 10.3390/s20226492
27. Liu Y.-J., Hu H.-Y. The research on GPS Frequency domain anti-jamming algorithms // *5th Intern. Conf. on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Beijing, China, 24–26 Sept. 2009. IEEE, 2009.* P. 1–3.
doi: 10.1109/WICOM.2009.5302508
28. Borio D. Sub-band Robust GNSS Signal Processing for Jamming Mitigation // *European Navigation Conf., Gothenburg, Sweden, 14–17 May 2018. IEEE, 2018.* P. 72–83.
doi: 10.1109/EURONAV.2018.8433250
29. Evaluation of mitigation methods against COTS PPDs. / J. R. Van der Merwe, A. Rügamer, F. Garzia, W. Felber, J. Wendel // *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symp., Monterey, USA, 23–26 Apr. 2018. IEEE, 2018.* P. 920–930.
doi: 10.1109/PLANS.2018.8373470
30. Musumeci L., Dosis F. A Comparison of Transformed-Domain Techniques for Pulsed Interference Removal on GNSS Signals // *Intern. Conf. on Localization and GNSS, Starnberg, Germany, 25–27 June 2012. IEEE, 2012.* P. 1–6.
doi: 10.1109/ICL-GNSS.2012.6253131
31. Time-Frequency Analysis for GNSSs / M. G. Amin, D. Borio, Y. D. Zhang, L. Galleani // *IEEE Signal Processing Magazine.* 2017. Vol. 34, № 5. P. 85–95.
doi: 10.1109/MSP.2017.2710235
32. Huang H., Sun K. Interference Detection and Suppression Based on Time-Frequency Analysis // *Advances in Aerospace Science and Technology.* 2022. Vol. 7, № 2. P. 97–111.
doi: 10.4236/aast.2022.72006
33. Qingshui L., Honglei Q. An improved method based on time-frequency distribution to detect time-varying interference for GNSS receivers with single antenna // *IEEE Access.* 2017. Vol. 7. P. 38608–38617.
doi: 10.1109/ACCESS.2019.2906262
34. Zhang P., Wu Q., Jing B. Interference Mitigation Low Complexity Subspace Tracking Method for Vehicle Positioning // *Discrete Dynamics in Nature and Society.* 2022. Vol. 2022, № 1. P. 1–12.
doi: 10.1155/2022/7502191
35. Savasta S., Presti L.L., Rao M. Interference Mitigation in GNSS Receivers by a Time-Frequency Approach // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems.* 2013. Vol. 49, № 1. P. 415–438.
doi: 10.1109/TAES.2013.6404112
36. Rezaei M. J., Mosavi M. R., Abedi M. New GPS anti-jamming system based on multiple short-time Fourier transform // *IET Radar, Sonar and Navigation.* 2016. Vol. 10, № 4. P. 807–815.
doi: 10.1049/iet-rsn.2015.0417
37. Sun K., Jin T., Yang D. A New Reassigned Spectrogram Method in Interference Detection for GNSS Receivers // *Sensors.* 2015. Vol. 15, № 9. P. 22167–22191.
doi: 10.3390/s150922167

38. Aldirmaz S., Durak L. Interference Excision in Spread Spectrum Communication Systems Based on STFT // *Progress in Electromagnetics Research*. 2008. Vol. 7. P. 309–320.
doi: 10.2528/PIERB08050803

39. A novel GNSS Interference Detection Method Based on Smoothed Pseudo-Wigner–Hough Transform / K. Sun, B. Yu, M. Elhajj, W.Y. Ochieng, T. Zhang, J. Yang // *Sensors*. 2021. Vol. 21, № 13. P. 1–22.
doi: 10.3390/s21134306

40. Sun K., Zhang M., Yang D. A New Interference Detection Method based on Joint Hybrid Time-Frequency Distribution for GNSS Receivers // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2016. Vol. 65, № 11. P. 9057–9071.
doi: 10.1109/TVT.2016.2515718

41. Sun K., Jin T., Yang D. An Improved Time-Frequency Analysis Method in Interference Detection for GNSS Receivers // *Sensors*. 2015. Vol. 15, № 4. P. 9404–9426.
doi: 10.3390/s150409404

42. Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. Чои–Вильямс-анализ сигналов с особенностями // *Радиофизика и радиоастрономия*. 2015. Т. 20, № 3. С. 223–237.
doi: 10.15407/rpra20.03.223

43. Choi–Williams Transform and Atomic Functions in Digital Signal Processing / V. F. Kravchenko, O. V. Lazorenko, V. I. Pustovoi, L. F. Chernogor // *Doklady Physics*. 2007. Vol. 52, № 4. P. 207–210.
doi: 10.1134/S102833580704009X

44. Коломенский К. Ю., Демидова А. Ю. Интеграция спутникового сегмента в спецификации 3GPP для сетей 5G. Ч. I // *Электросвязь*. 2023. Т. 43, № 6. С. 14–19.
doi: 10.34832/ELSV.2023.43.6.002

45. Коломенский К. Ю., Демидова А. Ю. Интеграция спутникового сегмента в спецификации 3GPP для сетей 5G. Ч. II // *Электросвязь*. 2023. Т. 43, № 7. С. 13–19.
doi: 10.34832/ELSV.2023.44.7.002

Информация об авторе

Коломенский Константин Юрьевич – кандидат технических наук (1986), заместитель директора по науке Национального исследовательского центра телекоммуникаций им. М. И. Кривошеева, Филиал в Санкт-Петербурге. Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов – гибридные наземно-спутниковые сети подвижной связи 5G/5GA и 6G; глобальные навигационные спутниковые системы, спутниковые и наземные системы радиосвязи и радиомониторинга; перспективные цифровые технологии. Адрес: Национальный исследовательский центр телекоммуникаций им. М. И. Кривошеева, Филиал в Санкт-Петербурге, Большой Смоленский пр., д. 4А, Санкт-Петербург, 192029, Россия
E-mail: kolomenskiiky@nic-t.ru
<https://orcid.org/0009-0002-4468-4857>

References

1. Sharifi-Tehrani O., Ghasemi M. H. A Review on GNSS-Threat Detection and Mitigation Techniques. *Cloud Computing and Data Science*. 2022, vol. 4, no. 2, pp. 161–185.
doi: 10.37256/ccds.4320231678

2. Ioannides R. T., Pany T., Gibbons G. Known Vulnerabilities of Global Navigation Satellite Systems, Status and Potential Mitigation Techniques. *Proc. of the IEEE*. 2016, vol. 104, no. 6, pp. 1174–1194.
doi: 10.1109/JPROC.2016.2535898

3. Dovi F., Di Torino P. GNSS Interference, Threats, and Countermeasures. Norwood, Artech House, 2015, 220 p.

4. Gao G. X., Sgammini M., Lu M., Kubo N. Protecting GNSS Receivers from Jamming and Interference. *Proc. of the IEEE*. 2016, vol. 104, no. 6, pp. 1327–1338.
doi: 10.1109/JPROC.2016.2525938

5. Kolomensky K. Yu. Interference Detection for GNSS Receivers. Pt. I. *Electrosvyaz Magazine*. 2024, no. 10, pp. 44–51. (In Russ.)
doi: 10.34832/ELSV.2024. 59.10.007

6. Kolomensky K. Yu. Interference Detection for GNSS Receivers. Pt. II. *Electrosvyaz Magazine*. 2024, no. 11, pp. 39–48. (In Russ.)
doi: 10.34832/ELSV.2024.60.11.006

7. Hegarty C., Van Dierendonck A. J., Bobyn D., Tran M., Kim T., Grabowski J. Suppression of Pulsed In-

terference Through Blanking. *Proc. of the IAIN World Congress and the Annual Meeting of the Institute of Navigation AM/ION*, San Diego, United States, 26–28 June 2000. Institute of Navigation, 2000, pp. 399–408.

8. Soualle F., Cattenoz M., Zecha C., Giger K. Improved Analytical Models of SNIR Degradation in Presence of Pulsed Signals and Impact of Code-Pulse Synchrony. *Proc. 5th European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing*, Toulouse, France, Dec. 2011. Institute Aéronautique et Spatial (IAS), 2011, pp. 1–18.

9. Grabowski J., Hegarty C. Characterization of L5 Receiver Performance Using Digital Pulse Blanking. *Proc. of the 15th Intern. Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 2002)*, Portland, United States, 24–27 Sept. 2002. Institute of Navigation, 2002, pp. 1630–1635.

10. Borio D., Cano E. Optimal Global Navigation Satellite System Pulse Blanking in the Presence of Signal Quantization. *IET Signal Process.* 2013, vol. 7, no. 5, pp. 400–410.
doi: 10.1049/iet-spr.2012.0199

11. Madhani P. H., Axelrad P., Krumvieda K., Thomas J. Application of Successive Interference Cancellation to the GPS Pseudolite Near-Far Problem.

22 **Методы подавления помех при приеме сигналов глобальных навигационных спутниковых систем на основе обработки сигналов во временной, частотной и частотно-временной областях**
GNSS Interference Mitigation Methods Based on Signal Processing in Time, Frequency and Time-Frequency Domains

IEEE Trans. Aerospace Electronic Systems. 2003, vol. 39, no. 2, pp. 481–488.
doi: 10.1109/TAES.2003.1207260

12. Razzaque A. B. A., Baiocchi A. Analysis of Status Update in Wireless Networks with Successive Interference Cancellation. IEEE Transactions on Wireless Communications. 2024, pp. 1–16. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2409.00277> (accessed 07.08.2025).

13. Chien Y. Design of GPS Anti-Jamming Systems Using Adaptive Notch Filters. IEEE Systems J. 2015, vol. 9, no. 2, pp. 451–460.
doi: 10.1109/JSYST.2013.2283753

14. Borio D., Camoriano L., Presti L. Two-Pole and Multi-Pole Notch Filters: A Computationally Effective Solution for GNSS Interference Detection and Mitigation. IEEE System J. 2008, vol. 2, no. 1, pp. 38–47.
doi: 10.1109/JSYST.2007.914780

15. Xiao Y., Takeshita Y., Shida K. Tracking Properties of a Gradient-Based Second-Order Adaptive IIR Notch Filter with Constrained Poles and Zeros. IEEE Transactions Signal Processing. 2002, vol. 50, no. 4, pp. 878–888.
doi: 10.1109/78.992134

16. El Gebali A., Landry R. J. Comparing the Performances between Adaptive Notch Filter Direct and Lattice Forms Structures for Mitigation Jamming Signals. Communications and Network. 2022, vol. 14, no. 3, pp. 91–107.
doi: 10.4236/cn.2022.143007

17. Borio D., Gioia C. GNSS Interference Mitigation: A Measurement and Position Domain Assessment. Navigation: J. of The Institute of Navigation. 2021, vol. 68, no. 5, pp. 93–114.
doi: 10.1002/navi.391

18. Musumeci L., Curran J. T., Dovic F. A Comparative Analysis of Adaptive Notch Filtering and Wavelet Mitigation against Jammers Interference. Navigation: J. of the Institute of Navigation. 2016, vol. 63, no. 4, pp. 533–550.
doi: 10.1002/NAVI.167

19. Borio D. A Multi-State Notch Filter for GNSS Jamming Mitigation. Intern. Conf. on Localization and GNSS, Helsinki, Finland, 24–26 June 2014. IEEE, 2014, pp. 1–6.
doi: 10.1109/ICL-GNSS.2014.6934175

20. Borio D. A Loop Analysis of Adaptive Notch Filters. IET Signal Processing. 2016, vol. 10, no. 6, pp. 659–669.
doi: 10.1049/iet-spr.2015.0310

21. Nakamura S., Koshita S., Abe M., Kawamata M. A New Lattice-Based Adaptive Notch Filtering Algorithm with Improved Mean Update Term. Asia-Pacific Signal and Information Proce. Association Annual Summit and Conf., Kaohsiung, Taiwan, 29 Oct.–01 Nov. 2013. IEEE, 2013, pp. 1–4.
doi: 10.1109/APSIPA.2013.6694169

22. Khan N. A., Aguado L. E. Adaptive Notch Filter based Interference Characterization and Mitigation for GNSS Receivers. Proc. of the 37th Intern. Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Baltimore, Maryland, 16–20 Sept. 2024. Institute of Navigation, 2024, pp. 2984–2994.
doi: 10.33012/2024.19819

23. Borio D., O'Driscoll C., Fortuny J. Fast and Flexible: Tracking and Mitigating a Jamming Signal with an Adaptive Notch Filter. Inside GNSS. 2014, vol. 9, pp. 67–73.

24. Yousif T., Blunt P. Interference Mitigation for GNSS Receivers Using FFT Excision Filtering Implemented on an FPGA. Eng. 2022, vol. 3, no. 4, pp. 439–466.
doi: 10.3390/eng3040032

25. Capozza P. T., Holland B. J., Hopkinson T. M., Landrau R. L. A Single-Chip Narrow-Band Frequency-Domain Excisor for a Global Positioning System (GPS) Receiver. IEEE J. of Solid-State Circuits. 2000, vol. 35, no. 3, pp. 401–411.
doi: 10.1109/4.826823

26. Garzia F., Van der Merwe J. R., Rügamer A., Urquijo S., Felber W. HDDM Hardware Evaluation for Robust Interference Mitigation. Sensors. 2020, vol. 20, iss. 22, pp. 1–24.
doi: 10.3390/s20226492

27. Liu Y.-J., Hu H.-Y. The Research on GPS Frequency Domain Anti-Jamming Algorithms. 5th Intern. Conf. on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Beijing, China, 24–26 Sept. 2009. IEEE, 2009, pp. 1–3.
doi: 10.1109/WICOM.2009.5302508

28. Borio D. Sub-band Robust GNSS Signal Processing for Jamming Mitigation. European Navigation Conf., Gothenburg, Sweden, 14–17 May 2018. IEEE, 2018, pp. 72–83.
doi: 10.1109/EURONAV.2018.8433250

29. Van der Merwe J. R., Rügamer A., Garzia F., Felber W., Wendel J. Evaluation of Mitigation Methods Against COTS PPDs. IEEE/ION Position, Location and Navigation Symp. Monterey, USA, 23–26 Apr. 2018. IEEE, 2018, pp. 920–930.
doi: 10.1109/PLANS.2018.8373470

30. Musumeci L., Dovic F. A Comparison of Transformed-Domain Techniques for Pulsed Interference Removal on GNSS Signals. Intern. Conf. on Localization and GNSS, Starnberg, Germany, 25–27 June 2012. IEEE, 2012, pp. 1–6.
doi: 10.1109/ICL-GNSS.2012.6253131

31. Amin M. G., Borio D., Zhang Y. D., Galleani L. Time-Frequency Analysis for GNSSs. IEEE Signal Processing Magazine. 2017, vol. 34, no. 5, pp. 85–95.
doi: 10.1109/MSP.2017.2710235

32. Huang H., Sun K. Interference Detection and Suppression Based on Time-Frequency Analysis. Advances in Aerospace Science and Technology. 2022, vol. 7, no. 2, pp. 97–111.
doi: 10.4236/aast.2022.72006

33. Qingshui L., Honglei Q. An Improved Method Based on Time-Frequency Distribution to Detect Time-Varying Interference for GNSS Receivers with Single Antenna. IEEE Access. 2017, vol. 7, pp. 38608–38617.
doi: 10.1109/ACCESS.2019.2906262.

34. Zhang P., Wu Q., Jing B. Interference Mitigation Low Complexity Subspace Tracking Method for Vehicle Positioning. Discrete Dynamics in Nature and Society. 2022, vol. 2022, no. 1, pp. 1–12.
doi: 10.1155/2022/7502191

35. Savasta S., Presti L.L., Rao M. Interference Mitigation in GNSS Receivers by a Time-Frequency Approach. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2013, vol. 49, no. 1, pp. 415–438. doi: 10.1109/TAES.2013.6404112
36. Rezaei M. J., Mosavi M. R., Abedi M. New GPS Anti-Jamming System Based on Multiple Short-Time Fourier Transform. *IET Radar, Sonar and Navigation*. 2016, vol. 10, no. 4, pp. 807–815. doi: 10.1049/iet-rsn.2015.0417
37. Sun K., Jin T., Yang D. A New Reassigned Spectrogram Method in Interference Detection for GNSS Receivers. *Sensors*. 2015, vol. 15, no. 9, pp. 22167–22191. doi: 10.3390/s150922167
38. Aldirmaz S., Durak L. Interference Excision in Spread Spectrum Communication Systems Based on STFT. *Progress in Electromagnetics Research*. 2008, vol. 7, pp. 309–320. doi: 10.2528/PIERB08050803
39. Sun K., Yu B., Elhajj M., Ochieng W. Y., Zhang T., Yang J. A Novel GNSS Interference Detection Method Based on Smoothed Pseudo-Wigner-Hough Transform. *Sensors*. 2021, vol. 21, no. 13, pp. 1–22. doi: 10.3390/s21134306
40. Sun K., Zhang M., Yang D. A New Interference Detection Method based on Joint Hybrid Time-Frequency Distribution for GNSS Receivers. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2016, vol. 65, no. 11, pp. 9057–9071. doi: 10.1109/TVT.2016.2515718
41. Sun K., Jin T., Yang D. An Improved Time-Frequency Analysis Method in Interference Detection for GNSS Receivers. *Sensors*. 2015, vol. 15, no. 4, pp. 9404–9426. doi: 10.3390/s150409404
42. Lazorenko O. V., Chernogor L. F. The Choi-Williams-Analysis of Non-Linear Wave Processes. *Radio Physics and Radio Astronomy*. 2015, vol. 20, no. 3, pp. 223–237. (In Russ.) doi: 10.15407/rpra20.03.223
43. Kravchenko V. F., Lazorenko O. V., Pustovoi V. I., Chernogor L. F. Choi-Williams Transform and Atomic Functions in Digital Signal Processing. *Doklady Physics*. 2007, vol. 52, no. 4, pp. 207–210. doi: 10.1134/S102833580704009X
44. Kolomensky K. Yu., Demidova A. Yu. Integration of Satellite Segment into 3GPP specifications for 5G networks. Pt. I. *Electrosvyaz Magazine*. 2023, vol. 43, no. 6, pp. 14–19. (In Russ.) doi: 10.34832/ELSV.2023.43.6.002
45. Kolomensky K. Yu., Demidova A. Yu. Integration of Satellite Segment into 3GPP specifications for 5G networks. Pt. II. *Electrosvyaz Magazine*. 2023, vol. 43, no. 7, pp. 13–19. (In Russ.) doi: 10.34832/ELSV.2023.44.7.002

Information about the author

Konstantin Yu. Kolomensky, Cand. Sci. (Eng.) (1986), Deputy Director on Science of The M. I. Krivosheev National Research Centre for Telecommunication, St Petersburg Branch. The author more than 30 scientific publications. Area of expertise: 5G/5GA and 6G hybrid terrestrial-satellite mobile communication networks; global navigation satellite systems; satellite and terrestrial radio communication and radio monitoring systems; advanced digital technologies. Address: The M. I. Krivosheev National Research Centre for Telecommunication, St Petersburg Branch, 4A, Bolshoy Smolensky Ave, St Petersburg 192029, Russia
E-mail: kolomenskiiky@nic-t.ru
<https://orcid.org/0009-0002-4468-4857>