

На правах рукописи

Царик Владимир Игоревич

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ
СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ В ГЛОБАЛЬНЫХ
НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ**

2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» на кафедре радиотехники.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Глушанков Евгений Иванович

Официальные
оппоненты:

Григорьев Владимир Александрович,
доктор технических наук, профессор,
генеральный директор ООО «Лаборатория
инфокоммуникационных сетей», действительный
член Академии инженерных наук им.
А.М. Прохорова, президент Санкт-Петербургского
отделения АИН

Веремьев Владимир Иванович,
кандидат технических наук,
директор НИИ «Прогноз», профессор кафедры
радиотехнических систем Санкт-Петербургского
государственного электротехнического университета
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Ведущая организация: Ордена Трудового Красного Знамени федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Московский
технический университет связи и информатики»,
г. Москва

Защита состоится 2 июля 2025 года в 16.00 на заседании диссертационного
совета 55.2.004.01, созданного на базе Федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-
Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф.
М.А. Бонч-Бруевича», по адресу: Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22,
корп. 1, ауд. 554/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУТ по адресу
Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1 и на сайте www.sut.ru.

Автореферат разослан 5 мая 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 55.2.004.01,
канд. техн. наук, доцент

А.Г. Владыко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Использование глобальных навигационных спутниковых систем (далее — ГНСС) в качестве средства определения местоположения в наши дни широко распространено практически во всех сферах деятельности человека. Изначально данный вид средств позиционирования разрабатывался для применения исключительно вооружёнными силами отдельных государств. Однако со временем ввиду весьма большого потенциала полезного применения ГНСС область их использования была расширена и на сугубо гражданские отрасли. На данный момент решение множества задач в таких критически важных областях, как промышленность, экономика, логистика и транспорт чрезвычайно сильно зависит от средств определения местоположения, использующих ГНСС. На 2025 год насчитывается четыре ГНСС, обеспечивающих непрерывную работу устройств позиционирования на всей земной поверхности: «ГЛОНАСС», «GPS», «Бэйдоу» и «Галилео».

Вместе с областью применения ГНСС с течением времени растёт и количество требований, выдвигаемых к качеству их работы. Одним из них является помехоустойчивость, то есть способность осуществлять исправное позиционирование в условиях наличия в эфире искажающих полезный информационный сигнал помеховых излучений. Данное свойство в некоторой степени присуще стандартной аппаратуре, осуществляющей приём спутниковых навигационных сигналов. Однако ввиду чрезвычайно низкой мощности такого сигнала вблизи поверхности Земли принимающая его система становится весьма уязвимой к воздействию помех различного происхождения. Наряду с внутренними помехами, возникающими в радиотехнических системах естественным образом, серьёзную опасность для средств навигации представляют внешние целенаправленно излучаемые помеховые сигналы. Такие воздействия могут быть не только результатом работы профессиональных систем постановки помех — как наземных, так и установленных на летательных аппаратах, в частности, беспилотных — но и возникать при излучении с помощью дешёвых переносных любительских устройств, число доступных вариантов которых с годами лишь растёт. Всё вышесказанное обуславливает высокую актуальность задачи повышения помехоустойчивости спутниковых радионавигационных систем.

Одним из известных способов решения данной задачи является фильтрация с использованием в радиотехнических системах многоканальных приёмных антенных решёток. Обработка, действующая на сигналы из пространственно разнесённых каналов решётки называется, соответственно, пространственной. Данный вид сигнальной обработки обладает рядом преимуществ по сравнению с использованием одноканальных фильтров. В частности, увеличение числа

антенных элементов решётки позволяет также повысить число потенциально подавляемых источников помех. Кроме того, качество пространственной обработки может быть улучшено при использовании дополнительных временных составляющих обрабатываемых сигналов или фильтрации в частотной области, что делает данную методику достаточно гибким инструментом повышения помехоустойчивости. При этом, несмотря на довольно подробное освещение данного способа обработки в соответствующей литературе, ещё не все его возможности и характеристики изучены в полной мере, особенно в плане практической реализации. Это делает задачу повышения помехоустойчивости ГНСС посредством различных видов пространственной обработки сигналов весьма актуальной и представляющей серьёзный научный интерес.

Степень разработанности темы исследования. Задача повышения помехоустойчивости ГНСС посредством сигнальной обработки достаточно хорошо изучена. Её решению посвящено значительное количество работ отечественных и зарубежных учёных, среди которых стоит выделить труды В. А. Варгаузина, О. В. Горячкина, В. А. Григорьева, В. И. Джигана, Дж. Кейпона (J. Capon), В. Н. Манжоса, Р. А. Монзинго (R. A. Monzingo), Т. У. Миллера (T. W. Miller), А. В. Оппенгейма (A. V. Oppenheim), А. И. Перова, С. Д. Стирнса (S. D. Stearns), Р. Л. Стратоновича, В. И. Тихонова, Г. Л. Ван Триса (H. L. Van Trees), Б. Уидроу (B. Widrow), Г. А. Фокина, В. Н. Харисова, М. Х. Хейеса (M. H. Hayes), С. Хейкина (S. Haykin), И. А. Цикина, А. М. Чуднова, Р. У. Шафера (R. W. Schafer) и Я. Д. Ширмана. Многие из результатов, приведённых в работах указанных авторов, являются в основном теоретическими, прикладных исследований — особенно применительно к ГНСС — существенно меньше, либо они рассчитаны лишь на успешное практическое применение только в условиях определённых ограничений. В этой связи можно констатировать, что известные результаты, полученные при решении упомянутой задачи, могут получить плодотворное развитие в ходе дальнейших исследований.

Целью данной работы является повышение помехоустойчивости глобальных навигационных спутниковых систем за счёт применения алгоритмов пространственной обработки сигналов.

Объектом исследования являются методы и алгоритмы пространственной обработки сигналов ГНСС.

Предметом исследования в работе является помехоустойчивость ГНСС при использовании методов и алгоритмов пространственной обработки.

Научной задачей работы является разработка алгоритмов пространственной обработки сигналов, обеспечивающих повышение помехоустойчивости спутниковых радионавигационных систем и обладающих

повышенной энергетической эффективностью и пониженной вычислительной сложностью.

Для достижения указанной цели в работе решаются следующие частные задачи:

1. Разработать модифицированные алгоритмы обращения тёплицевых и циркулянтных корреляционных матриц входных сигналов пространственного компенсатора помех, оценить их вычислительную сложность и провести сравнительный анализ их работы.
2. Разработать модифицированные алгоритмы пространственной обработки спутниковых навигационных сигналов в частотной области, задействующие информацию об окружающей радиотехническую систему помеховой обстановке и обладающие повышенной энергетической эффективностью, провести сравнительный анализ их работы.
3. Провести эксперименты по реализации аппаратно-программного комплекса, включающего в себя пространственную обработку входных сигналов, обеспечивающую корректное решение навигационной задачи и обладающую повышенной энергетической эффективностью.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм численного обращения эрмитовых тёплицевых корреляционных матриц, обеспечивающий снижение вычислительной сложности на 15–30% по сравнению с известными аналогичными алгоритмами, использующимися при пространственной обработке сигналов.
2. Алгоритмы пространственной обработки спутниковых навигационных сигналов в частотной области, задействующие информацию о числе и местоположении источников помех и обеспечивающие энергетический выигрыш на 5–10 дБ по сравнению с известными алгоритмами пространственной обработки.
3. Аппаратно-программный комплекс пространственной обработки сигналов в помехозащищённом навигационном приёмнике, обеспечивающий решение навигационной задачи при воздействии помех с одновременным энергетическим выигрышем по сравнению с известными вариантами реализации.

Научная новизна результатов исследования состоит в следующем:

1. Предложена новая формула для выборочного приближения корреляционной матрицы входных сигналов пространственного компенсатора помех, впервые позволяющая вычислять её как эрмитову циркулянтную матрицу в случае применения кольцевой антенной решётки.

2. Для обращения тёплицевых корреляционных матриц при решении задачи построения весовых коэффициентов пространственных фильтров применён новый модифицированный алгоритм Барайсса, имеющий пониженную вычислительную сложность по сравнению с другими известными алгоритмами обращения матриц подобной особой структуры.
3. Предложен комплекс алгоритмов пространственной обработки сигналов в частотной области, задействующий новые методы вычисления количества источников помех, оптимизации целевых функций для определения направлений на помехи и обеспечивающий корректную работу алгоритмов обработки и увеличение её энергетического выигрыша по сравнению с другими известными методами с учётом специфики имеющей место помеховой обстановки.
4. Предложен новый аппаратно-программный комплекс обработки сигналов, имеющий в своей основе новый модифицированный алгоритм пространственно-временной обработки и специально подобранные комплектующие и обеспечивающий корректную сигнальную обработку с достижением энергетического выигрыша по сравнению с известными реализациями.

Теоретическая и практическая значимость.

Теоретическая значимость результатов работы заключается в следующем:

- проведена модернизация численного метода аппроксимации циркулянтной корреляционной матрицы входного сигнала пространственного компенсатора помех с кольцевой антенной решёткой, на основе модернизации выведена новая формула выборочного приближения эрмитовой циркулянтной корреляционной матрицы;
- проведена модернизация численного алгоритма Барайсса для обращения тёплицевых матриц, на основе которой построен новый алгоритм обращения эрмитовых тёплицевых матриц;
- разработан комплекс алгоритмов пространственной обработки сигналов в частотной области, включающий в себя как методы непосредственной фильтрации сигналов, так и новые алгоритмы поиска информации о количестве и расположении источников помех;
- в рамках реализации аппаратно-программного комплекса пространственной фильтрации спутниковых навигационных сигналов создан новый алгоритм пространственно-временной обработки, полученный в результате модернизации предложенного пространственного алгоритма.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что разработанные методы сигнальной обработки и сопутствующие алгоритмы, а также предложенный аппаратно-программный комплекс обработки сигналов

можно применять в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах при решении задач

- обеспечения корректной работы средств спутниковой навигации в условиях воздействия помех различной природы за счёт повышения их помехоустойчивости;
- имитационного моделирования работы помехозащищённых спутниковых радионавигационных систем в условиях сложной и непрерывно изменяющейся сигнально-помеховой обстановки;
- исследования поведения значений характеристик энергетической и спектральной эффективности и вычислительного быстродействия помехоустойчивых спутниковых радионавигационных систем;
- изучения характеристик качества работы устройств, реализующих отдельные процедуры сигнальной обработки в составе более сложных комплексов помехозащищённого спутникового позиционирования.

Методология и методы исследования. При проведении исследований были использованы методы теории сигналов и их цифровой обработки, теории спутниковой радионавигации, дискретного гармонического анализа, линейной алгебры, теории вероятностей и математической статистики, машинного обучения, вычислительной математики, экстремальных задач, математического моделирования и инженерии программного обеспечения. Используемые инструменты имитационного моделирования включают в себя программирование на языках C++ и MATLAB.

Достоверность полученных результатов подтверждается:

- корректным применением проверенного математического аппарата;
- результатами имитационного моделирования, машинных и натурных экспериментов;
- соответствием полученных результатов предшествующим исследованиям;
- обсуждением результатов на международных научных конференциях и их публикацией в рецензируемых научных журналах.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались со специалистами на российских и международных научных конференциях:

- Всероссийская научно-методическая конференция «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре для цифровой экономики» (Санкт-Петербург, 2021 г., 2022 г.);
- Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (Санкт-Петербург, 2022 г., 2024 г.);
- Международная отраслевая научно-техническая конференция «Технологии информационного общества» (Москва, 2022 г.);

- Международная конференция «2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications» (Москва, 2023 г.).
- Международная конференция «IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)» (Батуми, Грузия, 2023 г.; Ереван, Армения, 2024 г.)

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 16 печатных изданиях, 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 3 — в изданиях, индексируемых Scopus, 5 — в сборниках трудов конференций, индексируемых РИНЦ, 4 представляют собой отчёты о научно-исследовательской работе. Зарегистрированы 2 программы для ЭВМ.

Реализация результатов работы. Полученные в диссертационной работе результаты были внедрены в АО «ЭЛАРА» при проведении опытно-конструкторских работ по разработке блока подавления помех спутниковой навигационной аппаратуры, а также в Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича в рамках научно-исследовательской работы «РАСТР», что подтверждается полученными актами о внедрении и подготовленными отчётами о научно-исследовательской работе.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.2.13 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»:

- 3. Разработка и исследование радиотехнических устройств и систем, обеспечивающих улучшение характеристик точности, быстродействия и помехоустойчивости.
- 5. Разработка и исследование алгоритмов, включая цифровые, обработки сигналов и информации в радиотехнических устройствах и системах различного назначения, в том числе синтез и оптимизация алгоритмов обработки.
- 6. Разработка и исследование методов и алгоритмов обработки сигналов и информации в радиотехнических устройствах и системах различного назначения, включая системы телевидения и передачи информации, при наличии помех с целью повышения помехоустойчивости.
- 8. Разработка и исследование радиотехнических устройств и систем передачи информации, в том числе эфирных, радиорелейных и космических, с целью повышения их пропускной способности, помехоустойчивости и помехозащищенности.

Личный вклад. Диссертационная работа выполнена лично автором, все результаты теоретических и экспериментальных исследований получены автором самостоятельно. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит основная роль при постановке и решении задач, а также обобщении полученных результатов. Доклады на конференциях сделаны автором лично.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 2 приложений. Полный объём диссертации составляет 185 страниц текста, включая 42 рисунка и 16 таблиц. Список литературы содержит 125 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** к работе обоснована актуальность темы исследования, определены его объект и предмет, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту, а также приведены сведения об апробации работы и публикациях по её теме.

В **первой главе** приведены общие сведения о существующих ГНСС и принципах их функционирования. Описаны используемые в ГНСС полезные сигналы, имеющие вид колебаний с модуляцией дальномерными кодами и двоичной последовательностью закодированных навигационных данных. Отдельный акцент сделан на описании ГНСС отечественной разработки — системе «ГЛОНАСС», использование которой в последние годы стало особенно актуальным, что также обусловило и возросшую важность решения задачи повышения помехоустойчивости данной ГНСС.

Приведена классификация помеховых воздействий, способных мешать исправному функционированию ГНСС и искажать передаваемую в них навигационную информацию. По результатам рассмотрения приведённой классификации сделан вывод об особо серьёзном эффекте, оказываемом по отношению к ГНСС взаимными от других наземных радиоэлектронных средств и преднамеренными внешними помеховыми воздействиями по сравнению с естественными внутрисистемными помехами. Для подробного исследования в рамках диссертационной работы выделен класс излучаемых извне пространственно-разнесённых некоррелированных широкополосных энергетических помех, осуществляющих глушение полезных спутниковых навигационных сигналов.

Описаны различные количественные показатели, характеризующие помехоустойчивость ГНСС и использовавшиеся в диссертационном исследовании для оценки качества работы методов повышения помехоустойчивости и сравнительного анализа. Наиболее важным показателем качества работы ГНСС является обеспечиваемая ею точность позиционирования, которая зависит от вероятности возникновения ошибок в передаваемых потребителю навигационных сообщениях. Данная характеристика работы ГНСС тесно связана с таким энергетическим показателем качества принимаемого потребителем сигнала, как отношение сигнал/шум (далее — ОСШ). Ещё одной характеристикой помехоустойчивости ГНСС, использованной в данной диссертационной работе, был коэффициент подавления (далее — КП) помех, равный отношению мощностей сигнала до и после обработки компенсатором помех. С учётом необходимости проведения обработки на весьма ограниченном интервале длительности сигнала, а также в

связи с высокими размерностями задач построения весовых коэффициентов цифровых фильтров выделен ещё один важный показатель качества работы алгоритмов фильтрации — быстродействие, выражаемое временем их работы, либо количеством производимых ими операций. Приведена формальная постановка решаемой в работе задачи определения алгоритма обработки, оптимального с точки зрения введённых показателей — как энергетических характеристик фильтрации, так и быстродействия.

Перечислены некоторые из основных используемых в ГНСС методов повышения помехоустойчивости, особенности их устройства и реализации, их преимущества и недостатки, а также типовые значения количественных характеристик качества их работы. На основе сравнения приведённых значений для подробного рассмотрения в рамках диссертационного исследования выделены алгоритмы пространственной обработки спутниковых навигационных сигналов как обеспечивающие наиболее качественное повышение помехоустойчивости ГНСС. Описана специфика устройства, реализации и работы методов пространственной обработки, их преимущества по сравнению с другими методами повышения помехоустойчивости ГНСС и существующие ограничения их применения, а также некоторые расширения и обобщения методов пространственной обработки, а именно — пространственно-временные алгоритмы и способы пространственной обработки спутниковых навигационных сигналов в частотной области.

Вторая глава посвящена прямым методам пространственной обработки спутниковых навигационных сигналов. При построении векторов весовых коэффициентов стандартных пространственных фильтров используются корреляционные матрицы входных сигналов фильтра, а также матрицы, обратные к ним. Примером такого фильтра может служить известный бимформер Кейпона, вектор w весовых коэффициентов которого определяется выражением

$$w = \frac{R^{-1}a}{a^H R^{-1}a},$$

где R — корреляционная матрица входных сигналов, a — управляющий вектор антенной решётки принимающей системы, верхний индекс H обозначает эрмитово сопряжение. Теоретически корреляционные матрицы определяются при помощи статистического усреднения отсчётов сигнала на бесконечном интервале его длительности. Однако на практике такой метод вычисления оказывается невозможен ввиду конечной длительности обрабатываемого сигнала. В этой связи при практических вычислениях корреляционные матрицы заменяются приближениями, рассчитанными на конечном объёме выборки, которые можно реализовать многими различными способами, имеющими свои преимущества и недостатки.

Один из негативных аспектов применения выборочных приближений корреляционных матриц заключается в том, что в большинстве случаев при такой аппроксимации итоговые матрицы теряют особую структуру, которой обладают исходные корреляционные матрицы за счёт использования в принимающей радиотехнической системе антенных решёток с определённой геометрией размещения антенных элементов. Так, в принимающей системе с прямоугольной антенной решёткой соответствующая корреляционная матрица является тёплицевой, а с кольцевой решёткой — циркулянтной. Для сохранения особой структуры при использовании выборочных приближений следует применять специальные способы аппроксимации. В работе была исследована известная формула выборочного приближения тёплицевых корреляционных матриц и на основе её корректировки и модернизации было построено выражение для выборочной аппроксимации эрмитовых циркулянтных корреляционных матриц. Для случая входного сигнала x , состоящего из N каналов и K комплексных временных отсчётов, элементы построенной аппроксимации $\hat{R}$ эрмитовой циркулянтной корреляционной матрицы имеют вид

$$\hat{r}_s = \begin{cases} \frac{1}{K(N-s)} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{N-s} x_{lk} x_{l+s,k}^*, & s = 0, \dots, M-1, \\ \frac{1}{K(N-s)} \left| \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{N-s} x_{lk} x_{l+s,k}^* \right|, & (s = M-1) \wedge (2|N), \\ \hat{r}_{N-s}^*, & s = M, \dots, N-1, \\ \hat{r}_{-s}^*, & s < 0, \end{cases}$$

где $M = \lfloor N/2 \rfloor + 1$, верхний индекс $*$ обозначает комплексное сопряжение.

Необходимость выполнения операции обращения корреляционных матриц для построения векторов весовых коэффициентов пространственных фильтров и одновременная серьёзная ограниченность временного интервала, на котором должна выполняться данная операция обуславливают высокую актуальность применения при пространственной обработке алгоритмов обращения матриц пониженной вычислительной сложности. Известно также, что для матриц с особой структурой существуют специальные алгоритмы обращения, в которых за счёт использования особого строения матриц достигается существенное уменьшение числа выполняемых операций. В рамках диссертационного исследования было проведено детальное сравнение нескольких известных методов обращения циркулянтных и тёплицевых матриц, в том числе специально разработанного алгоритма обращения с пониженной вычислительной сложностью.

В качестве быстрого метода обращения циркулянтных матриц на основе анализа был выбран алгоритм, заключающийся в диагонализации таких матриц

с использованием матрицы дискретного преобразования Фурье, то есть в применении равенства

$$A = \frac{1}{N} F_N^H \text{diag}\{F_N a\} F_N,$$

где A — обращаемая циркулянтная матрица порядка N , a — её образующий вектор, F_N — унитарная матрица преобразования Фурье. За счёт унитарности и диагональности входящих в данное разложение матриц операция обращения сводится к простым преобразованиям, имеющим вид делений, комплексных сопряжений и умножений на разрежённые матрицы. Использование при таком методе обращения дискретного преобразования Фурье в виде выражения $F_N a$ позволяет применять для его нахождения быстрые алгоритмы, дополнительно упрощающие вычисления. В случае использования быстрого преобразования Фурье по методу Кули — Тьюки вычислительную сложность описанного метода можно оценить как

$$C_{FFT} = N^3 + 6N^2 - 4N + 1.$$

В качестве быстрого алгоритма типа Левинсона для обращения тёплицевых матриц в диссертационной работе был рассмотрен алгоритм, предложенный Воеводиным и Тыртышниковым и заключающийся в итерационном вычислении первого столбца искомой обратной матрицы по первому столбцу a исходной эрмитовой тёплицевой матрицы A и последующему восстановлению всей результирующей матрицы по вычисленному первому столбцу. Итерационная процедура данного алгоритма инициализируется значением $\tilde{x}_0^{(0)} = 1/(a_0 p_0)$ для произвольного ненулевого числа p_0 и имеет следующий вид для $k = 1, \dots, N - 1$:

$$\begin{aligned} \tilde{s}_k &= -p_{k-1} \left(a_k \tilde{x}_0^{(k-1)} + \dots + a_1 \tilde{x}_{k-1}^{(k-1)} \right), \\ p_k &= \frac{p_{k-1}}{1 - |s_k|^2}, \\ \begin{pmatrix} \tilde{x}_0^{(k)} \\ \vdots \\ \tilde{x}_k^{(k)} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \tilde{x}_0^{(k-1)} \\ \vdots \\ \tilde{x}_{k-1}^{(k-1)} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \left(\tilde{x}_{k-1}^{(k-1)} \right)^* \\ \vdots \\ \left(\tilde{x}_0^{(k-1)} \right)^* \end{pmatrix} \tilde{s}_k. \end{aligned}$$

Итоговая обратная матрица A^{-1} находится по полученному вектору $\tilde{x} = p_{N-1} \tilde{x}^{(N-1)}$ с использованием известной формулы Гохберга — Семенцула. Вычислительная сложность данного алгоритма обращения определяется выражением

$$C_{BT} = \frac{4}{3} N^3 + 2N^2 + \frac{14}{3} N - 3.$$

Для обращения тёплицевых матриц быстрым алгоритмом типа Шура в работе применялась модификация метода Барайсса. Оригинальный алгоритм путём последовательного удаления из исходной матрицы лишних диагоналей позволяет одновременно вычислять элементы её разложения в произведение

верхне- и нижнетреугольной матриц, а также обратные к ним, в результате умножения которых получается искомая обратная матрица. Данный алгоритм был модернизирован с целью распространения на случай произвольной комплексной эрмитовой тѐплицевой матрицы. Если $A^{(0)} = A$ — исходная матрица, $M^{(0)} = E_N$ — единичная матрица порядка N , то итерационная процедура предложенного алгоритма имеет следующий вид для $k = 1, \dots, N - 1$:

$$\begin{aligned} m &= \frac{A_{k+1,1}^{(-k+1)}}{A_{NN}^{(-k+1)}}, \\ (Z_k)_{jl} &= \begin{cases} 1, & l = j + k, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \\ A^{(-k)} &= A^{(-k+1)} - mZ_k A^{(k-1)}, \\ A^{(k)} &= \text{rot}\{(A^{(-k)})^*\}, \\ M^{(-k)} &= M^{(-k+1)} - mZ_k M^{(k-1)}, \\ M^{(k)} &= \text{rot}\{(M^{(-k)})^*\}, \end{aligned}$$

где $\text{rot}\{Z\}$ обозначает матрицу, полученную из матрицы Z поворотом всех её элементов на 180° вокруг её центра. После выполнения всех итераций алгоритма искомые матрицы вычисляются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} U &= A^{(1-N)}, \\ L &= \left(\text{diag} \left\{ \left(\frac{1}{a_{11}^{(N-1)}}, \dots, \frac{1}{a_{NN}^{(N-1)}} \right) \right\} A^{(N-1)} \right)^{T2}, \\ U^{-1} &= \left(\text{diag} \left\{ \left(\frac{1}{a_{11}^{(N-1)}}, \dots, \frac{1}{a_{NN}^{(N-1)}} \right) \right\} M^{(N-1)} \right)^{T2}, \\ L^{-1} &= M^{(1-N)}, \end{aligned}$$

где верхний индекс $T2$ обозначает транспонирование относительно побочной диагонали. Количество операций, выполняемых предложенным алгоритмом, можно оценить выражением

$$C_{\text{Bareiss}} = N^3 + N^2 + N - 1.$$

Сравнение данной оценки с выражениями для вычислительной сложности других рассмотренных в работе алгоритмов обращения позволяет сделать вывод о минимальности количества операций у предложенного алгоритма по сравнению с остальными в связи с меньшими значениями постоянных коэффициентов при высших степенях N в указанных формулах.

С целью проверки качества работы предложенных формулы выборочного приближения эрмитовых циркулянтных корреляционных матриц и алгоритма обращения эрмитовых тѐплицевых матриц были проведены эксперименты по компьютерному моделированию пространственной обработки в среде MATLAB с использованием реальных сигналов ГНСС, энергетической заградительной помехи и антенных решѐток с различным числом антенных элементов и разной

геометрией их расположения. При построении определённого выше вектора весовых коэффициентов бимформера Кейпона с использованием матриц, обратных к корреляционным матрицам входных сигналов, измерялось время работы и количество выполненных операций для каждого из рассмотренных алгоритмов. Результаты измерений приведены на рисунке 1. Приведённые данные подтверждают вывод о пониженной вычислительной сложности предложенного алгоритма обращения по сравнению с другими рассмотренными алгоритмами как относительно времени работы, так и с точки зрения количества выполняемых операций.

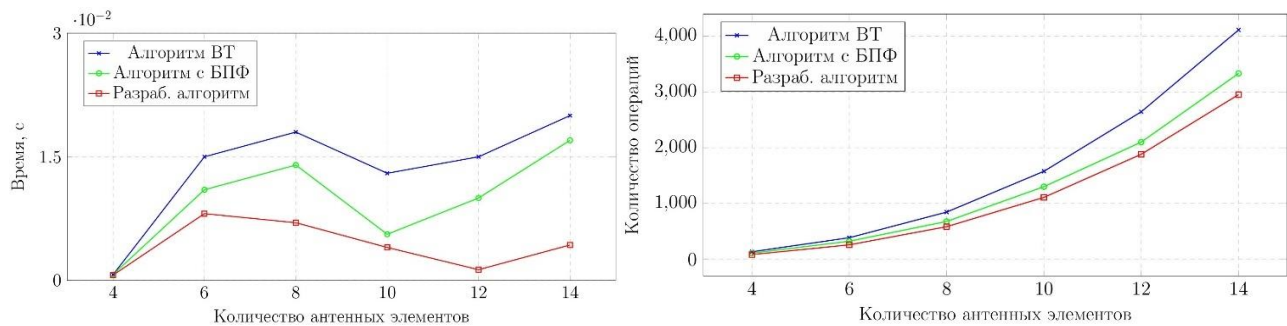


Рис. 1 — Показатели работы алгоритмов обращения: время работы (слева) и количество операций (справа).

На рисунке 2 приведены значения выигрыша по быстродействию при использовании предложенного алгоритма обращения по сравнению с другими рассмотренными методами. Из полученных данных видно, что подавляющее большинство значений выигрыша лежит в диапазоне от 15 до 30 процентов, что позволяет сделать вывод о том, что в среднем за счёт использования предложенного алгоритма достигаются соответствующие цифры выигрыша по быстродействию.

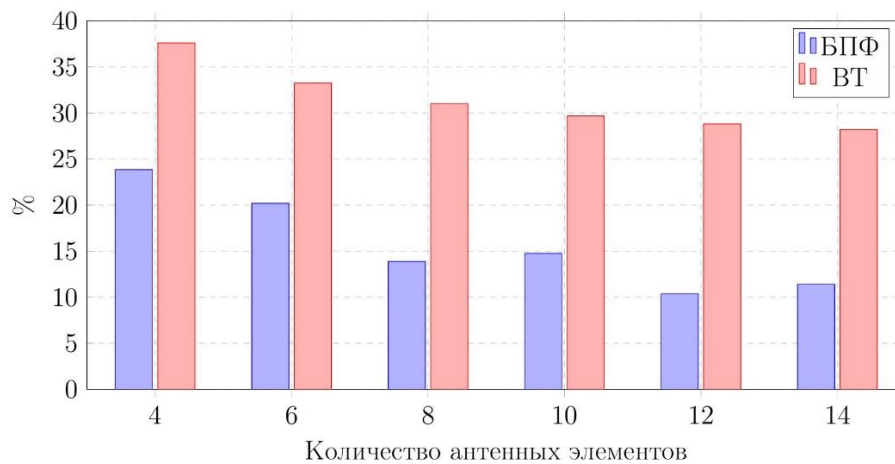


Рис. 2 — Выраженный в процентах выигрыш по количеству операций при использовании предложенного алгоритма по сравнению с другими рассмотренными.

На рисунках 3 и 4 представлены значения полученных при моделировании характеристик пространственной обработки спутниковых навигационных сигналов — КП и ОСШ — для случаев соответственно линейной и кольцевой антенных решёток. Из приведённых значений можно сделать вывод об успешном подавлении помех и хорошем качестве обработанного сигнала во всех проведённых экспериментах, а также о незначительном ухудшении параметров фильтров при использовании предложенной формулы выборочного приближения циркулянтных корреляционных матриц по сравнению с классической формулой, не учитывающей особую структуру матрицы.

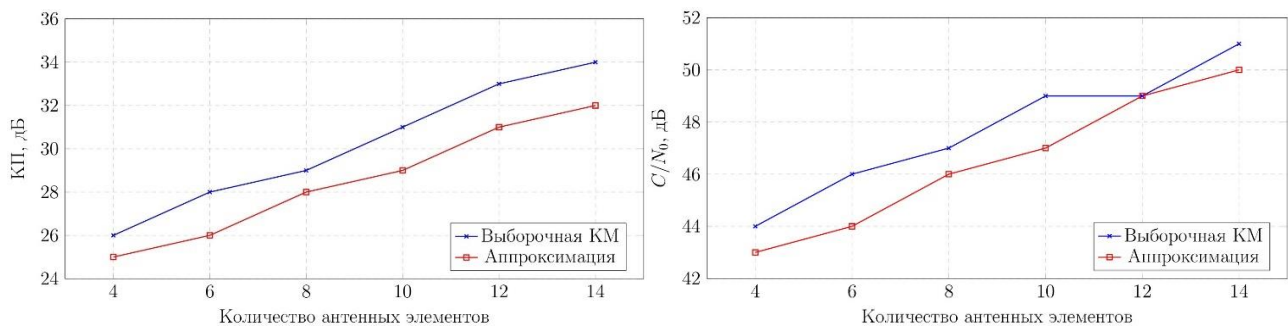


Рис. 3 — Показатели пространственной обработки для случая линейной решётки: КП (слева) и ОСШ (справа).

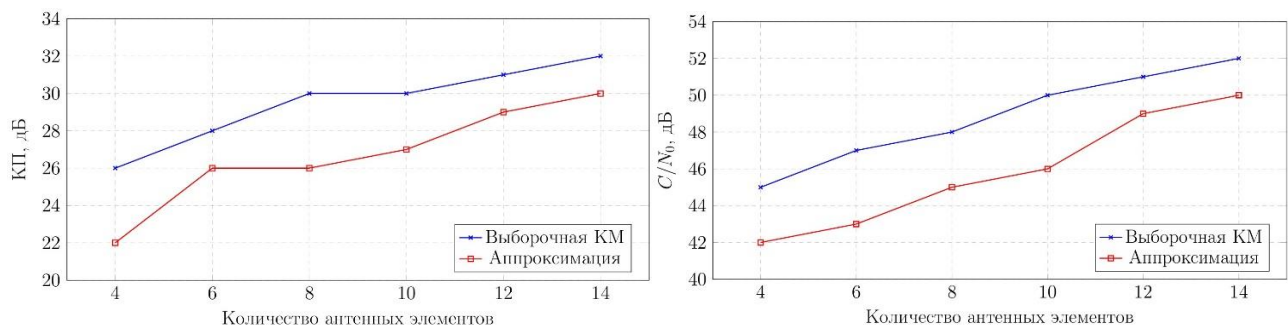


Рис. 4 — Показатели пространственной обработки для случая кольцевой решётки: КП (слева) и ОСШ (справа).

В третьей главе описываются методы пространственной обработки сигналов в частотной области. Основной идеей данного способа сигнальной обработки является применение пространственных фильтров к сигналу, подвергнутому дискретному преобразованию Фурье, с последующим выполнением обратного преобразования. Наиболее удобная схема проведения такой обработки состоит в последовательном выполнении фильтрации и преобразований Фурье на конечных подынтервалах длительности входного сигнала, длина которых равняется некоторой степени двойки, что позволяет применять для вычисления прямых и обратных преобразований Фурье быстрые алгоритмы.

Алгоритмы собственно пространственной обработки, используемые при фильтрации в частотной области, можно разделить на два класса: методы, не

использующие никакой априорной информации об окружающей принимающую систему помеховой обстановке, и алгоритмы, действующие при обработке информации об источниках помех — их количество и относительные угловые направления на них. К алгоритмам первой группы, рассматривавшимся в рамках диссертационной работы, относится упомянутый выше бимформер Кейпона, также известный как MPDR-бимформер. Из методов второго класса рассматривались два алгоритма с линейными ограничениями, известные как LCMR и LCMV-бимформеры. В выражения для векторов их весовых коэффициентов входят направления на подавляемые источники помех, которые необходимо определять отдельно с помощью специальных алгоритмов, входными данными для которых обычно являются сведения о количестве искоемых источников. В этой связи помимо методов непосредственно пространственной обработки в данной главе диссертационной работы также рассматривались различные методы определения количества источников помех, относительных угловых направлений на них, а также используемые для поиска направлений алгоритмы оптимизации целевых функций.

Идея всех рассмотренных в работе методов определения количества источников помех заключается в выделении во множестве собственных чисел корреляционной матрицы входных сигналов фильтра подмножества с наибольшими значениями и подсчёте их количества. В диссертационной работе было рассмотрено несколько методов решения данной задачи, основанных на разных подходах. Известные алгоритмы AIC и MDL относятся к методам статистического последовательного анализа и сводятся к поиску точки минимума определённой функции, построенной по рассматриваемому набору собственных чисел. Подсчёт медианного абсолютного отклонения в числовой выборке с использованием встроенной в среду MATLAB функции «isoutlier» позволяет определить отдельные её элементы как выбросы и, таким образом, найти места сильных скачков значений. Применение к набору собственных чисел функции десятичного логарифма позволяет увеличить вариацию значений данного набора и точнее определить позицию, в которой собственные числа претерпевают значительный скачок путём подсчёта положительных значений в получившемся множестве. Наконец, можно провести разделение набора собственных чисел на кластеры с сильно различающимися значениями с помощью кластеризации по известному методу k -средних. Вычисление моды от набора результатов работы всех алгоритмов позволяет получить единую оценку числа источников помех.

Все использовавшиеся в рамках диссертационного исследования алгоритмы определения положения источников помех сводятся к поиску экстремумов некоторой квадратичной формы Q , строящейся с использованием корреляционной матрицы R входных сигналов компенсатора помех и зависящей от двух переменных, соответствующих азимуту θ и углу места φ . Обычно число

N_I экстремумов, выбираемых в качестве оценок направлений на помехи, определяется заранее с помощью описанных выше алгоритмов вычисления числа источников помех. К использованным в диссертационной работе оптимизируемым квадратичным формам относятся следующие:

1. для алгоритма Beamsan: $Q_{Beamsan}(\theta, \varphi) = a^H(\theta, \varphi)Ra(\theta, \varphi)$,
2. для алгоритма Кейпона: $Q_{Capon}(\theta, \varphi) = \frac{1}{a^H(\theta, \varphi)R^{-1}a(\theta, \varphi)}$,
3. для алгоритма MUSIC: $Q_{MUSIC}(\theta, \varphi) = a^H(\theta, \varphi)Q_nQ_n^H a(\theta, \varphi)$,

где Q_n — матрица, составленная из собственных векторов R , соответствующих её $N - N_I$ наименьшим собственным числам.

В диссертационной работе также отдельно рассматривались некоторые алгоритмы, предназначенные для оптимизации приведённых выше целевых функций. Среди них — классический алгоритм градиентного спуска, реализованный специально для проведения исследований, а также два современных метаэвристических алгоритма — оптимизация «роем частиц» и «роем салпы», реализация которых встроена в среду MATLAB. Каждый из рассмотренных алгоритмов обладает преимуществом в виде сниженных вычислительных требований для проведения оптимизации.

С целью сравнения характеристик качества работы всех описанных выше методов сигнальной обработки и дополнительных алгоритмов были проведены эксперименты по компьютерному моделированию пространственной обработки в частотной области в среде MATLAB с использованием реальных сигналов ГНСС и различного числа некоррелированных источников энергетических помех. В ходе экспериментов измерялись различные характеристики качества работы всех видов описанных выше алгоритмов. На рисунке 5 приведены результаты работы алгоритмов определения числа источников помех. Данные свидетельствуют о наилучших результатах работы у алгоритма MDL и функции «isoutlier».

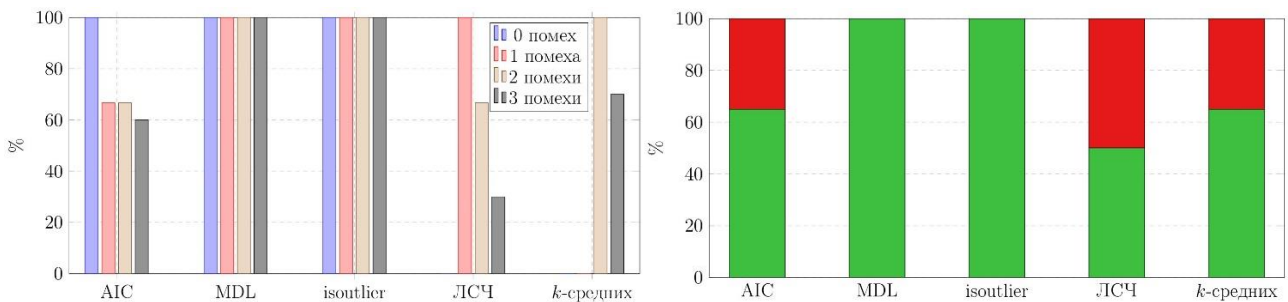


Рис. 5 — Результаты работы алгоритмов определения числа источников помех: доли правильных определений в разных экспериментах (слева) и доли правильных (зелёный) и неправильных (красный) определений (справа).

На рисунке 6 представлены результаты работы методов определения направлений на источники помех и алгоритмов оптимизации целевых функций. Из приведённых данных следует, что наилучшим образом оценивает

направления на помехи алгоритм Кейпона, а оптимизация в среднем быстрее всего реализуется методом роя частиц.

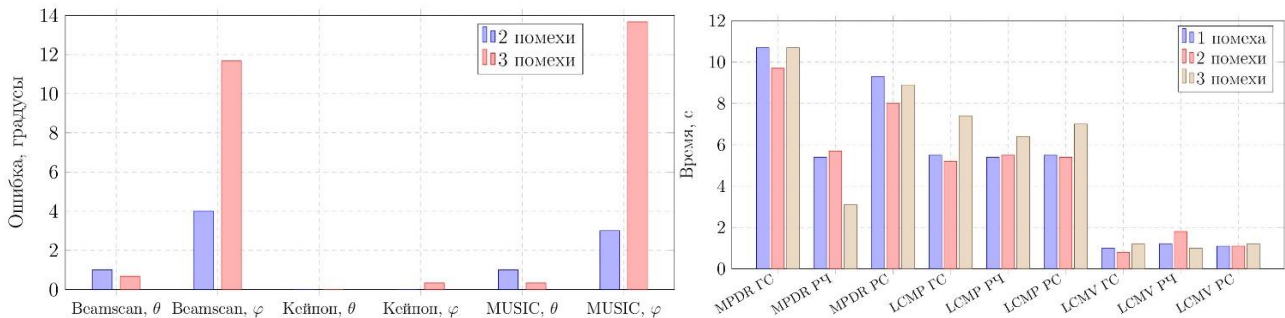


Рис. 6 — Средние абсолютные ошибки определения различными алгоритмами угловых направлений на помехи (слева) и время работы алгоритмов оптимизации функций (справа).

На рисунке 7 приведены значения полученных при моделировании характеристик пространственной обработки спутниковых навигационных сигналов — КП и ОСШ. Из приведённых значений можно сделать вывод об успешном подавлении помех и хорошем качестве обработанного сигнала во всех проведённых экспериментах.

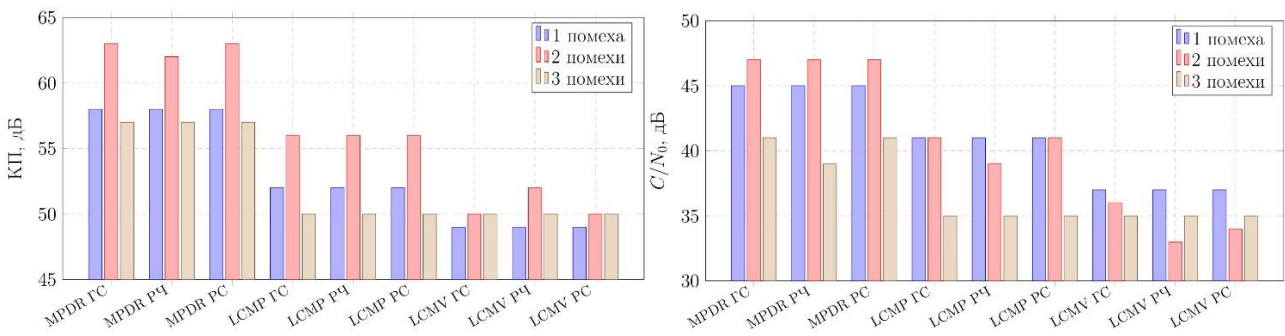


Рис. 7 — Показатели пространственной обработки в частотной области: КП (слева) и ОСШ (справа).

В целом по результатам моделирования можно выделить методы с наилучшими значениями показателей качества из каждой группы методов и из них составить целостный комплекс алгоритмов пространственной обработки в частотной области, обеспечивающий достижение энергетического выигрыша, который можно оценить как 5–10 дБ по сравнению с типовыми значениями.

Четвёртая глава посвящена практической реализации алгоритмов пространственной фильтрации спутниковых навигационных сигналов в виде аппаратно-программного комплекса сигнальной обработки в составе помехозащищённого навигационного приёмника, функционирующего в реальном масштабе времени. Итоговое устройство должно включать в себя всю аппаратуру, необходимую для правильного приёма спутниковых навигационных сигналов GPS L1, ГЛОНАСС G1 и ГЛОНАСС G2 в присутствии внешних некоррелированных энергетических помех относительно большой мощности,

для пространственной обработки принятых сигналов и последующей их демодуляции с целью получения навигационного решения. Также предполагается использование в итоговом устройстве восьмиэлементной антенной решётки.

Перед выбором элементной базы и конкретных комплектующих, построением и испытаниями комплекса была разработана модель сигнальной обработки, имевшая вид комплекса программ для ЭВМ и включавшая в себя цифровую фильтрацию и демодуляцию обработанных сигналов. В качестве метода обработки в данной модели был выбран алгоритм пространственно-временной фильтрации с периодическим вычислением корреляционных матриц путём аддитивного накопления, задающийся следующими формулами:

$$\begin{aligned} y(t) &= x_1(t) + (w_K(t), \tilde{x}'(t)), \\ \tilde{x}'(t) &= \left(\tilde{x}^T(t), \tilde{x}^T(t+1), \dots, \tilde{x}^T(t+N_T-1) \right)^T, \\ w_K &= -\hat{R}_K^{-1} r_K, \hat{R}_K = \sum_{t=1}^K \tilde{x}'(t) (\tilde{x}'(t))^H, r_K = \sum_{t=1}^K x_1^*(t) \tilde{x}'(t). \end{aligned}$$

Здесь x и y — соответственно входной и выходной сигналы фильтра, x_1 — первый входной канал фильтра, $\tilde{x}$ — входной сигнал без первого канала, N_T — количество временных задержек во входных каналах фильтра, K — период накопления матриц $\hat{R}_K$ и r_K . Использование пространственно-временной обработки вместо обыкновенной пространственной позволяет увеличить количество степеней свободы фильтрации и, как следствие, её итоговое качество, а реализация алгоритма с накоплением матриц обеспечивает снижение вычислительной нагрузки, повышение точности подсчёта выборочной оценки корреляционной матрицы входных сигналов и более удобную последующую имплементацию в реальном устройстве.

В рамках модели сигнальной обработки описанный пространственно-временной алгоритм был реализован в виде программы для ЭВМ на языке программирования C++. Второй составляющей модели был стандартный программный приёмник спутниковых навигационных сигналов системы GPS диапазона L1, реализованный в среде MATLAB и выполнявший демодуляцию обработанного сигнала с одновременным вычислением ОСШ в нём. Построенная модель была проверена в ходе серии экспериментов по компьютерному моделированию с использованием записей реальных сигналов ГНСС с добавлением различного числа некоррелированных источников энергетических помех. При моделировании измерялись энергетические характеристики обработки — КП и ОСШ. Полученные значения приведены на рисунке 8. Из высоких полученных значений показателей обработки можно сделать вывод об успешном подавлении помех и хорошем качестве обработанного сигнала во всех экспериментах. Из этого факта, а также из

правдоподобной динамики изменения энергетических характеристик обработки вытекает корректность построенной модели и возможность создания аппаратно-программного комплекса на её основе.

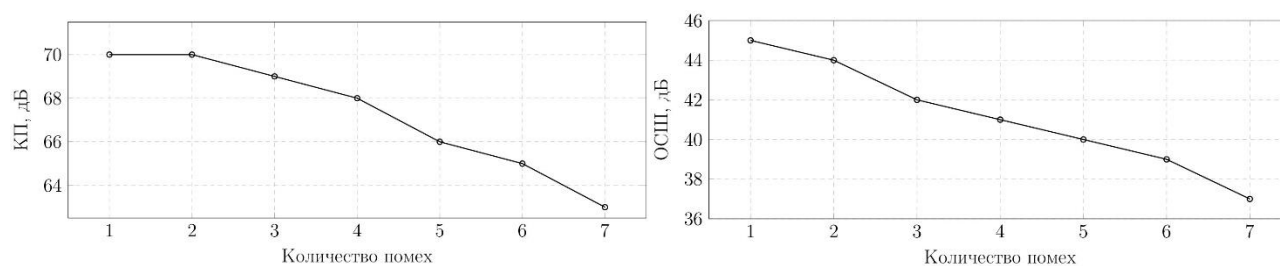


Рис. 8 — Показатели обработки для построенной модели: КП (слева) и ОСШ (справа).

В диссертационной работе приводятся два потенциальных варианта реализации итогового устройства — на основе отечественной и зарубежной элементной базы. В частности, описываются конкретные компоненты, реализующие отдельные этапы сигнальной обработки. В результате рассмотрения обоих вариантов делается вывод о большем удобстве реализации на основе импортной элементной базы, в связи с большей достижимой гибкостью, вычислительными мощностями и качеством работы. В рамках данного варианта реализации предполагалось использование трёх устройств: программируемая логическая интегральная схема AMD Xilinx XCKU035 для реализации сигнальной обработки, трансивер Analog Devices AD9364 для демодуляции обработанного сигнала и навигационный приёмник u-blox ZED-F9P для итогового решения навигационной задачи. Для выбранной интегральной схемы был произведён расчёт доли ресурсов, занимаемых внутри неё предложенным алгоритмом пространственно-временной обработки с параметрами $N_T = 5$ и $K = 1250$. Соответствующие значения приведены в таблице 1. Из них видно, что алгоритм успешно помещается в данной интегральной схеме и может быть реализован в ней.

Ресурс	Доступно	Использовано	Использовано, %
LUT	203128	185216	91,18
LUTRAM	112800	47142	41,79
FF	406256	368358	90,67
BRAM	540	405	75
DSP	1700	1435	84,41

Таблица 1 — Использование алгоритмом фильтрации различных ресурсов интегральной схемы.

Приёмные тракты итогового устройства были спроектированы с учётом необходимости одновременного приёма сигналов систем GPS и ГЛОНАСС. Также в итоговом устройстве была использована активная антенная решётка, представлявшая собой объединение в одном корпусе двух восьмиэлементных кольцевых эквидистантных решёток с разными радиусами, соответствующими

длинам волн сигналов диапазонов L1 и L2. Схема реализации устройства и его итоговый вид приведены на рисунке 9.

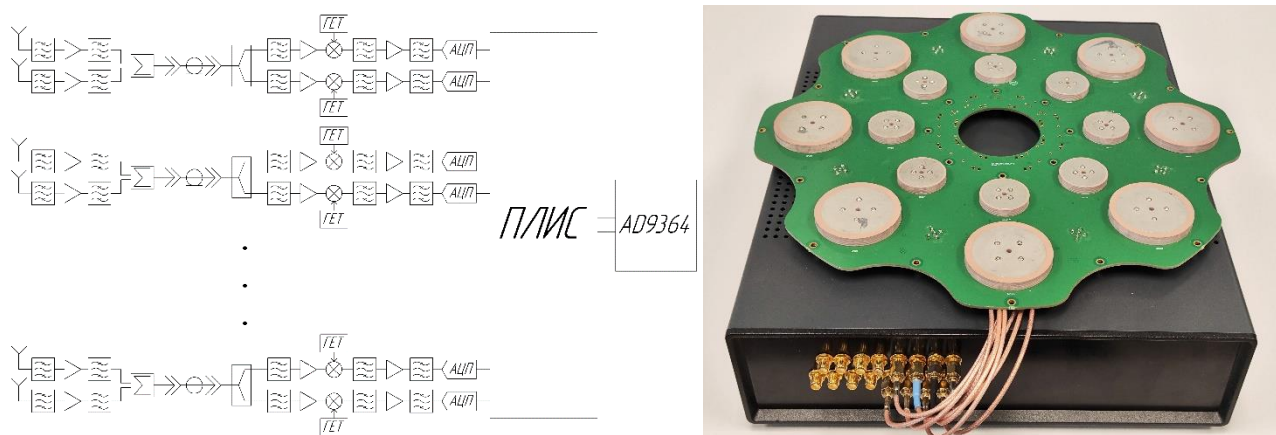


Рис. 9 — Схема реализации аппаратно-программного комплекса (слева) и итоговое устройство (справа).

С целью проверки корректности работы реализованного устройства были проведены натурные эксперименты по обработке им реальных сигналов ГНСС при одновременном воздействии нескольких некоррелированных энергетических заградительных помех. Во всех экспериментах после фильтрации через достаточно короткое время приемник входил в режим «Fixed», то есть получал навигационное решение. В ходе испытаний измерялись энергетические характеристики сигнальной обработки — КП и ОСШ. Полученные значения приведены на рисунке 10, из которого видно, что они достаточно велики и что динамика их изменения соответствует реальному поведению других подобных систем, а также модельным данным. Из этих результатов можно сделать вывод о правильности работы построенного устройства и достижении с его помощью энергетического выигрыша при сигнальной обработке.

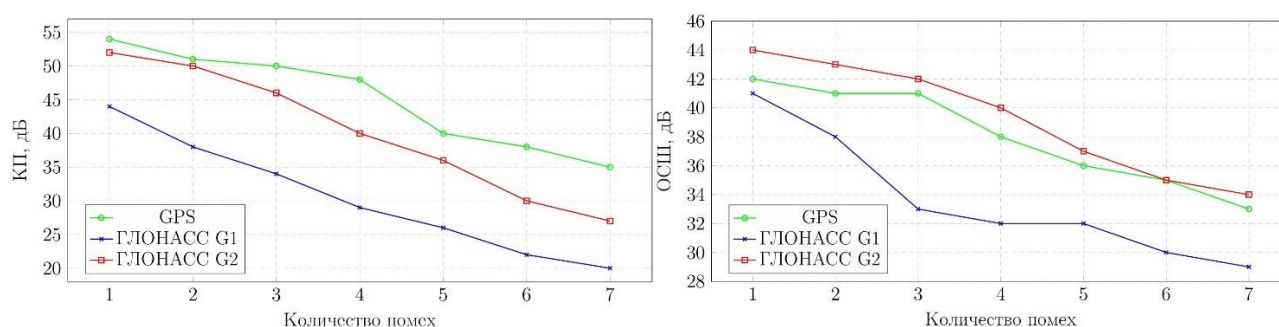


Рис. 10 — Показатели обработки, полученные в результате натурных экспериментов: КП (слева) и ОСШ (справа).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Построена новая формула для выборочного приближения корреляционной матрицы многоканального входного сигнала радиотехнической системы с кольцевой антенной решёткой как эрмитовой циркулянтной матрицы, основанная на известных результатах по качественной выборочной аппроксимации корреляционных матриц особых видов, учитывающая геометрию антенной решётки и взаимное расположение антенных элементов. Корректность применения построенной формулы подтверждена результатами компьютерного моделирования.
2. Предложен алгоритм обращения эрмитовых тёплицевых матриц, основанный на модификации алгоритма Барайсса для обращения вещественных матриц и предназначенный для применения при решении задач адаптации антенных решёток и построения весовых коэффициентов их фильтров. Подсчитана вычислительная сложность предложенного алгоритма и проведено её сравнение с количеством операций, необходимых для выполнения других известных алгоритмов обращения, применяемых в задачах адаптации антенных решёток особых видов. Вычислительные сложности всех рассмотренных алгоритмов представляют собой кубические функции от порядка обрабатываемой матрицы, однако в случае предложенного метода обращения постоянные множители, входящие в выражения для количества выполняемых операций, оказываются меньше, чем у других алгоритмов. За счёт использования предложенного алгоритма обращения при построении весовых коэффициентов цифровых фильтров достигается выигрыш по быстродействию, который можно оценить в 15–30%, что подтверждается результатами компьютерного моделирования.
3. Предложены алгоритмы пространственной обработки в частотной области, основанные на выражениях, задающих различные варианты оптимальных пространственных фильтров. Один из предложенных алгоритмов предназначен для проведения обработки в условиях отсутствия априорной информации об окружающей радиотехническую систему помеховой обстановке. Остальные алгоритмы рассчитаны на обработку с учётом наличия сведений о числе действующих источников помех и их расположении относительно приёмной системы. Также предложены различные дополнительные алгоритмы, обеспечивающие корректную работу приведённых методов обработки в частотной области. Среди них — методы определения числа источников помех, угловых направлений на них, а также алгоритмы оптимизации целевых

функций для поиска относительного положения источников помех. В частности, предложен метод определения числа помеховых сигналов, основанный на подсчёте собственных чисел корреляционной матрицы входного сигнала, превосходящих некоторое пороговое значение. Предложенные алгоритмы работают корректно и обеспечивают достижение энергетического выигрыша, который можно оценить в 5–10 дБ по сравнению с типичными значениями показателей цифровой фильтрации. Из алгоритмов с наилучшими характеристиками работы можно составить один целостный многоэтапный метод обработки, обеспечивающий повышение её совокупного качества.

4. Предложен аппаратно-программный комплекс обработки сигналов, обеспечивающий корректное позиционирование в условиях помехового воздействия. В качестве метода фильтрации сигналов взят модифицированный алгоритм пространственно-временной обработки, оптимизированный для удобства реализации. С целью предварительной проверки работоспособности аппаратно-программного комплекса построена его модель в виде группы программ для ЭВМ. По результатам машинных экспериментов с построенной моделью в различных помеховых обстановках показана её корректность и возможность построения аппаратно-программного комплекса обработки сигналов на её основе.
5. Рассмотрены различные устройства отечественного и зарубежного производства, потенциально подходящие в качестве комплектующих для предлагаемого аппаратно-программного комплекса. По результатам анализа приведённых устройств сделан вывод о большей перспективности реализации предлагаемого комплекса с использованием импортной элементной базы. Предложены конкретные устройства, реализующие каждый из отдельных этапов сигнальной обработки. Проведены натурные эксперименты с построенным аппаратно-программным комплексом в различных помеховых обстановках. Результаты экспериментов свидетельствуют о корректной работе предлагаемого комплекса при одновременном воздействии разного количества помех, а также о достижении им энергетического выигрыша при обработке по сравнению с типовыми значениями соответствующих характеристик, в том числе приведённых в первых главах работы.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК

1. Глушанков, Е. И. Анализ качества алгоритмов адаптивной пространственной и пространственно-частотной фильтрации сигналов в системах спутниковой навигации / Е. И. Глушанков, В. И. Царик // Труды учебных заведений связи. — 2022. — Т. 8, № 3. — С. 37—43.
2. Глушанков, Е. И. Прямые методы адаптации линейных и кольцевых антенных решеток в навигационных спутниковых системах / Е. И. Глушанков, В. И. Царик // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. — 2023. — Т. 26, № 1. — С. 6—16.
3. Глушанков, Е. И. Практическая реализация пространственно-временной фильтрации спутниковых навигационных сигналов в реальном времени / Е. И. Глушанков, В. И. Царик // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2023. — Т. 26, № 2. — С. 64—69.
4. Царик, В. И. Методы пространственной обработки спутниковых навигационных сигналов в частотной области / В. И. Царик // Труды учебных заведений связи. — 2024. — Т. 10, № 6. — С. 34—44.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы цитирования

5. *Glushankov, E. I.* Space-Frequency Beamforming Algorithms Comparison with a Circular Antenna Array / E. I. Glushankov, V. I. Tsarik // 2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. — Moscow, Russian Federation, 2023. — P. 1—5.
6. *Tsarik, V. I.* Constrained Adaptive Arrays for Narrow-Band GNSS Signal Receivers / V. I. Tsarik, V. I. Djigan // 2023 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). — Batumi, Georgia, 2023. — P. 1—5.
7. *Tsarik, V. I.* FPGA/ARM Design of Multibeam Adaptive Array for GNSS Receiver / V. I. Tsarik, D. A. Bitsulia, V. I. Djigan // 2024 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). — Yerevan, Armenia, 2024. — P. 1—5.

Публикации в других изданиях

8. Глушанков, Е. И. Адаптивная пространственная фильтрация сигналов в четырёхэлементной антенной решётке / Е. И. Глушанков, В. И. Царик // «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре для цифровой экономики» (ПКМ-2021). — Санкт-Петербург, 30.11.2021—02.12.2021. — С. 60—63.

9. Глушанков, Е. И. Анализ алгоритмов адаптивной пространственной фильтрации сигналов в кольцевой антенной решётке / Е. И. Глушанков, В. И. Царик // «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (АПИНО 2022). — Санкт-Петербург, 15.02.2022—16.02.2022. — С. 149—154.
10. Глушанков, Е. И. Алгоритмы пространственно-частотной обработки сигналов в антенных решётках / Е. И. Глушанков, В. И. Царик // «Технологии информационного общества». — Москва, 02.03.2022—03.03.2022. — С. 91—92.
11. Глушанков, Е. И. Прямые методы адаптивной пространственной фильтрации в кольцевых антенных решётках / Е. И. Глушанков, В. И. Царик // «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре для цифровой экономики» (ПКМ-2022). — Санкт-Петербург, 06.12.2022—08.12.2022. — С. 149—153.
12. Царик, В. И. Сравнение методов определения числа источников помех при адаптации антенных решёток / В. И. Царик // «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (АПИНО 2024). — Санкт-Петербург, 27.02.2024—28.02.2024. — С. 465—469.

Программы для ЭВМ

13. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. Моделирование пространственной обработки спутниковых навигационных сигналов в среде MATLAB с аппроксимацией выборочных корреляционных матриц [Текст] / В. И. Царик, Е. И. Глушанков, К. А. Родина. — №2024668269 ; опубл. 06.08.2024 (Рос. Федерация).*
14. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. Моделирование пространственно-частотной обработки спутниковых навигационных сигналов в среде MATLAB [Текст] / В. И. Царик, Е. И. Глушанков, К. А. Родина. — № 2024668095 ; опубл. 01.08.2024 (Рос. Федерация).*

Отчёты о научно-исследовательской работе

15. Разработка программ для проведения экспериментов и моделей для исследования адаптивных антенн в перспективном диапазоне частот. Этап 2. Разработка программы проведения натурных экспериментов с адаптивными антеннами и их элементами в перспективных диапазонах частот : отчёт о НИР / В. И. Царик [и др.]. — № ГР 222101200013-0. — СПб. : ООО «ЭЙРТЭГО», 2022. — 59 с.
16. Разработка программ для проведения экспериментов и моделей для исследования адаптивных антенн в перспективном диапазоне частот.

Этап 3. Проведение исследований адаптивных антенн и их элементов в перспективных диапазонах частот с применением разработанных моделей : отчёт о НИР / В. И. Царик [и др.]. — № ГР 222122700045-1. — СПб. : ООО «ЭЙРТЭГО», 2022. — 150 с.

17. Проведение натурных экспериментов с макетным образцом адаптивной восьмиэлементной цифровой антенной решетки. Этап 1 : отчёт о НИР / В. И. Царик [и др.]. — № ГР 223121900011-6. — СПб. : ООО «ЭЙРТЭГО», 2023. — 69 с.
18. Проведение натурных экспериментов с макетным образцом адаптивной восьмиэлементной цифровой антенной решетки. Этап 2. Исследование возможностей применения отечественной элементной базы для разработки макетного образца адаптивной восьмиэлементной цифровой антенной решетки в перспективном диапазоне частот : отчёт о НИР / В. И. Царик [и др.]. — № ГР 224011600282-6. — СПб. : ООО «ЭЙРТЭГО», 2023. — 68 с.