

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

кандидата технических наук Веремьева Владимира Ивановича
на диссертационную работу Царика Владимира Игоревича
«Разработка алгоритмов пространственной обработки спутниковых
навигационных сигналов в глобальных навигационных системах»,
представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук
по специальности 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства
телевидения

Актуальность темы исследования

Ввиду серьёзной уязвимости сигналов глобальных спутниковых навигационных систем даже по отношению к относительно слабым помеховым воздействиям, на сегодняшний день предлагается большое количество способов повышения помехоустойчивости данных систем. Современные методы подавления помех варьируются от различных аппаратных до программных решений. При этом одним из наиболее эффективных подходов последнего класса является применение пространственной обработки сигналов, поступающих на многоэлементную адаптивную антенную решётку. Известно, что использование алгоритмов пространственной обработки позволяет достичь наибольшей величины режекции помеховых воздействий по сравнению с другими цифровыми методами подавления помех. Однако, несмотря на хорошую проработанность темы пространственной обработки в научной литературе, качество практической реализации многих методов может быть улучшено с применением различных вычислительных подходов, и верхняя граница эффективности данных алгоритмов пока не достигнута.

В связи с этим тема исследования Царика В. И., посвященная разработке вычислительно эффективных алгоритмов пространственной обработки

сигналов, является весьма актуальной и имеет большую практическую значимость.

Структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений, изложенных на 185 страницах. Список использованной литературы состоит из 125 наименований.

Во **введении** к работе показывается актуальность её темы, приводятся формулировки целей и задач работы, объекта и предмета исследования, перечисляются положения, выносимые на защиту, раскрываются новизна и ценность результатов исследования, указываются сведения о публикациях, апробации и реализации работы.

В **первой главе** приводятся общие сведения о глобальных спутниковых навигационных системах, особенностях их функционирования, используемых в них типах сигналов. Подчёркивается высокая уязвимость спутниковых навигационных систем к воздействию помех и обосновывается актуальность задачи повышения помехоустойчивости. Приводится классификация характерных для данной задачи помеховых воздействий. Перечисляются основные методы борьбы с помехами и показатели качества их работы. Особый акцент делается на пространственной обработке сигналов как на наиболее эффективном и перспективном подходе.

Во **второй главе** рассматривается обработка сигналов пространственными фильтрами, требующими вычисления и обращения корреляционных матриц входных сигналов в системах с антенными решётками с особой геометрией. Описывается разработанная автором формула выборочного приближения эрмитовых циркулянтных корреляционных матриц и новый метод их обращения, имеющий пониженную вычислительную сложность по сравнению с другими известными аналогичными алгоритмами. Приводятся результаты компьютерного

моделирования с реальными спутниковыми сигналами и помехами, действующего предложенные формулу и алгоритм.

В **третьей главе** описываются методы пространственной обработки спутниковых сигналов в частотной области. Перечисляются как методы, не требующие получения информации о помеховой обстановке, так и функционирующие с использованием знания количества источников помех и относительных угловых направлений на них. Описываются дополнительные алгоритмы, способствующие получению указанной информации о внешней среде. Указываются результаты компьютерного моделирования с использованием реальных спутниковых навигационных сигналов и некоррелированных энергетических помех, а также всех упомянутых алгоритмов. В ходе анализа результатов определяются методы обработки с наилучшими характеристиками качества повышения помехоустойчивости.

Четвёртая глава посвящена описанию реализации аппаратно-программного комплекса в составе помехозащищённого навигационного приёмника. Реализация выполняется на основе построенной модели обработки разработанным пространственно-временным методом, её корректность подтверждается в ходе машинных экспериментов с реальными спутниковыми сигналами и помехами. Проект реализации комплекса выполняется посредством подбора конкретных комплектующих, необходимых для проведения отдельных этапов сигнальной обработки. Заканчивается глава описанием экспериментов по обработке итоговым устройством реальных спутниковых сигналов при одновременном воздействии энергетических помех.

В **заключении** перечисляются основные результаты проведённых исследований, по ним делаются выводы и даются практические рекомендации.

В приложениях приведены полученные автором свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, а также акты о внедрении результатов диссертационной работы.

Научная новизна

Научной новизной обладают следующие результаты диссертационной работы:

1. Новая формула для выборочной аппроксимации циркулянтных эрмитовых корреляционных матриц входных сигналов компенсаторов помех, действующих кольцевые антенные решётки.

2. Новый метод обращения эрмитовых тёплицевых матриц, имеющий пониженную алгоритмическую сложность в сравнении с другими специальными алгоритмами обращения таких матриц.

3. Комплекс новых алгоритмов пространственной обработки спутниковых сигналов в частотной области, действующий информацию о действующих источниках помех и позволяющий достичь повышения значений показателей качества фильтрации.

4. Новая реализация аппаратно-программного комплекса помехозащищённого позиционирования, позволяющая решать навигационную задачу при одновременном воздействии помех и достигающая энергетического выигрыша при сигнальной обработке.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость результатов работы заключается в следующем:

1. Путём модернизации известных численных методов получены новые результаты для случая использования при пространственной обработке антенных решёток с особым размещением элементов, а именно новая формула

выборочного приближения корреляционных матриц входных сигналов таких решёток и новый алгоритм обращения подобных матриц.

2. Разработаны новые алгоритмы поиска информации о внешних источниках помех, которые могут применяться в составе комплекса методов пространственной обработки сигналов в частотной области.

3. Построена модель обработки спутниковых сигналов новым пространственно-временным фильтром, пригодная к применению в рамках реализации соответствующих устройств помехозащищённого спутникового позиционирования.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что полученные алгоритмы сигнальной обработки и предложенную реализацию устройства, осуществляющего помехоустойчивую навигацию, можно использовать в различных исследовательских и практических работах, связанных с построением помехозащищённой навигационной аппаратуры, в частности, при проведении машинных и натурных экспериментов с ней. Практическая значимость дополнительно подтверждается подготовленными отчётами о научно-исследовательской работе и полученными актами о внедрении её результатов.

Степень достоверности и обоснованности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов работы вытекают из корректного использования проверенного теоретического инструментария, адекватно поставленных задач и экспериментов, соответствия их результатов предыдущим исследованиям по данной теме.

Достоверность и обоснованность положений диссертационной работы также подтверждаются публикациями в рецензируемых научных изданиях и выступлениями автора на международных научных конференциях. Всего по теме исследования автором опубликовано 18 научных трудов. В это число

входят 4 публикации в журналах, рекомендованных ВАК, 3 публикации в изданиях, индексируемых международной системой Scopus, 5 публикаций в сборниках трудов конференций, индексируемых РИНЦ, 4 отчёта о научно-исследовательской работе и 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. В рамках апробации результатов работы автором сделано 8 докладов на российских и международных научно-практических конференциях.

Качество оформления диссертации

Диссертационная работа оформлена в полном соответствии с ГОСТ Р 7.0.11–2011. Текст работы написан ясным и чётким литературным языком, выдержан научный стиль повествования.

Замечания по содержанию работы

Вместе с несомненными достоинствами работы необходимо сделать и ряд замечаний:

1. В главе 2 используется обозначение « $\text{rot}\{Z\}$ » для матрицы, полученной из данной матрицы Z в результате поворота всех её элементов на 180 градусов вокруг условного центра матрицы. Однако, сокращение «rot» достаточно широко распространено в отдельных областях высшей математики и физики для обозначения оператора вычисления ротора векторного поля. Данное переобозначение может ввести читателя в заблуждение и затруднить понимание полученных в работе результатов.

2. В первой главе работы несколько раз упоминается негативное влияние многолучевого распространения сигналов (в том числе помеховых) на качество их приёма и корректность работы алгоритмов фильтрации. Однако в большинстве случаев для компьютерного моделирования сигнальной обработки в исследовании создавались рафинированные условия с использованием безэховой камеры, в которой многолучевое распространение электромагнитных волн сведено к минимуму. Насколько далеки от реальных

условий эксперименты, поставленные таким способом? Можно ли провести качественный анализ работы алгоритмов подавления помех с многолучевым распространением, близким к реальному (например, в условиях городской застройки и тому подобных)?

3. Видится недостаточно обоснованным переход в главе 4 от рассмотренных ранее пространственных методов обработки к использованию пространственно-временного алгоритма с соответствующим серьёзным повышением вычислительной сложности.

4. В работе отсутствуют результаты исследования предлагаемых алгоритмов пространственной обработки сигналов в условиях воздействия наихудших для данного метода помех (импульсных, хаотических импульсных и пр.), которые могут существенно повлиять на помехоустойчивость навигационной аппаратуры потребителей ГНСС.

5. В качестве пространственных фильтров в работе используются линейные фильтры, что не является оптимальным для негауссовских воздействий, особенно в каналах с замираниями.

Указанные замечания не влияют на общую высокую оценку диссертации В. И. Царика.

Общее заключение

Диссертация Царика Владимира Игоревича по теме «Разработка алгоритмов пространственной обработки спутниковых навигационных сигналов в глобальных навигационных системах» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, написанную автором самостоятельно и содержащую решение актуальной научной задачи. Диссертационная работа обладает внутренним единством, новизной, а также практической и теоретической значимостью. Автореферат соответствует диссертации и в достаточной мере отражает её содержание и результаты. Тема и результаты диссертационной работы соответствуют пунктам 3, 5, 6 и 8

паспорта специальности 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Считаю, что представленная диссертационная работа полностью соответствует приведённым в пп. 9-14 Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 №842 "О порядке присуждения учёных степеней" критериям, предъявляемым в отношении кандидатских диссертаций, а её автор Царик Владимир Игоревич заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Официальный оппонент



В. И. Веремьев

19.05.25

Кандидат технических наук по специальности 05.12.14, директор НИИ «Прогноз», профессор кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина).

Адрес организации: 197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5, литера Ф.

Телефон: +7 812 234-46-51.

E-mail: info@etu.ru.

Подпись Владимира Ивановича Веремьева заверяю:

ПОДПИСЬ
НАЧАЛЬНИКА
Т.Л.

