

На правах рукописи



ИППОЛИТОВ СЕРГЕЙ ПАВЛОВИЧ

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКИ
РАДИОСИГНАЛОВ В НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЕ
ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ
СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОМЕХ**

05.12.14 - Радиолокация и радионавигация

**Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

Москва – 2020

Работа выполнена на кафедре радиотехнических систем федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Научный
руководитель:

Перов Александр Иванович
доктор технических наук, профессор

Официальные
оппоненты:

Фатеев Юрий Леонидович
доктор технических наук, профессор,
профессор военно-инженерного института
федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Сибирский федеральный университет»

Пельтин Антон Владимирович
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник НИИ РЭТ федерального
государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Московский
государственный технический университет имени
Н.Э. Баумана (национальный исследовательский
университет)»

Ведущая организация: АО «Конструкторское бюро навигационных систем»


Защита диссертации состоится 25 марта 2021 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.141.11 при ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ)», расположенный по адресу 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ)» www.bmstu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1, учёному секретарю диссертационного совета Д 212.141.11 ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ)».

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
Д 212.141.11 д.т.н., проф.



И. Б. Власов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Среднеорбитальные спутниковые радионавигационные системы (СРНС) ГЛОНАСС (Россия), GPS (США) полномасштабно развернуты в 1995 г. (ГЛОНАСС) и 1994 г. (GPS). В настоящее время разворачиваются СРНС Galileo (Европейский союз), BeiDou (Китай). За время эксплуатации СРНС доказали свою эффективность при решении задач геодезии, морской и наземной навигации, мониторинга транспорта, телекоммуникационных систем, оборонной отрасли. Одним из сегментов СРНС является навигационная аппаратура потребителей (НАП). Радиосигналы навигационных спутников на входе НАП имеют малую мощность — минус 158–161 дБВт для радиосигналов ГЛОНАСС с частотным разделением, минус 155–158 дБВт для радиосигналов ГЛОНАСС с кодовым разделением, минус 155–159 дБВт для радиосигналов GPS. Поэтому стандартная НАП достаточно легко может быть подавлена радиоэлектронными помехами, что говорит о её низкой помехоустойчивости, под которой понимается свойство НАП выполнять целевую функцию при воздействии помех.

Одним из эффективных путей повышения помехоустойчивости НАП является использование антенных решеток (АР), которые за счет использования различий пространственного положения источников навигационных и помеховых радиосигналов обеспечивают ослабление воздействия помех и улучшение характеристики приема навигационных радиосигналов. Такой подход позволяет повысить помехоустойчивость на 50 дБ и более.

Исследования применения методов пространственно-временной (ПВО) радиосигналов навигационных спутников (НС) в НАП берут свое начало с конца 80-х годов 20 века и интенсивно развиваются в настоящее время. В большинстве известных работ разрабатываются алгоритмы ПВО применительно к воздействию *маскирующих помех*.

Следует отметить, что наряду с значительными достижениями в области пространственно-временной обработки радиосигналов, не все задачи в этой области полностью решены. К таким задачам относятся:

- пространственно-временная обработка при воздействии имитационных помех на НАП;
- разработка алгоритмов ПВО для НАП при воздействии маскирующих помех, характеризующихся меньшими вычислительными затратами при реализации при сохранении эффективности подавления помех.

Таким образом, существует **актуальная задача** повышения помехоустойчивости НАП СРНС при воздействии маскирующих и имитационных помех с использованием антенных решеток и новых алгоритмов пространственно-временной обработки радиосигналов, снижения вычислительных затрат на реализацию таких алгоритмов.

Целью работы является улучшение характеристик НАП СРНС, работающей при воздействии помех, путем совершенствования алгоритмов пространственно-временной обработки.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **основные задачи**:

1. Синтез алгоритма фильтрации параметров навигационного радиосигнала в НАП с АР при воздействии имитационной помехи.
2. Имитационное моделирование синтезированного алгоритма фильтрации параметров навигационного радиосигнала в НАП с АР при воздействии имитационной помехи с оценкой характеристик точности.
3. Синтез алгоритма пространственной обработки в действительной форме в НАП с АР при воздействии маскирующей помехи на примере задачи оценки начальной фазы навигационного радиосигнала.
4. Имитационное моделирование синтезированного алгоритма пространственной обработки в действительной форме в НАП с АР при воздействии маскирующей помехи с оценкой характеристик подавления помехи.
5. Проведение экспериментального исследования упрощенного алгоритма пространственной обработки навигационных радиосигналов в действительной форме при воздействии маскирующей помехи на макете.

В диссертации под «алгоритмом пространственной обработки в *действительной форме*» понимается описание принимаемых радиосигналов и алгоритма обработки в форме действительных чисел, в отличие от традиционного описания принимаемых радиосигналов и алгоритма обработки в форме комплексных чисел.

Объектом исследования настоящей диссертации выступает помехозащищенная НАП СРНС.

Предметом исследования являются алгоритмы пространственно-временной обработки радиосигналов в НАП с антенной решеткой, обеспечивающие повышение помехоустойчивости НАП при воздействии маскирующих помех и улучшение точностных характеристик при воздействии имитационных помех.

Методология, принятая в диссертации — использование методов оптимального приема и обработки радиосигналов, основанных на статистическом описании явлений и процессов и включающих синтез оптимальных алгоритмов обработки и анализ их статистических характеристик.

При решении поставленных задач использованы следующие **методы исследования**: методы теории оптимальной фильтрации случайных процессов, статистическая теория радиотехнических систем, имитационное компьютерное моделирование, экспериментальные методы.

Основными результатами и положениями, выносимыми на защиту, являются:

1. Алгоритм фильтрации параметров навигационного радиосигнала в НАП с АР при воздействии имитационной помехи, отличающийся от известных тем, что в нем проводится оценка параметров навигационного радиосигнала и имитационной помехи и, при оценке

параметров навигационного сигнала, компенсируется имитационная помеха, а при оценке параметров имитационной помехи компенсируется навигационный радиосигнал.

2. Реализация алгоритма фильтрации параметров навигационного радиосигнала в НАП с АР при воздействии имитационной помехи позволяет обеспечить надежное слежение за фазой и задержкой огибающей навигационного радиосигнала при мощности имитационной помехи, превышающей мощность навигационного радиосигнала не более чем на 16дБ .
3. Алгоритм пространственной обработки в действительных числах в НАП с АР при воздействии маскирующей помехи на примере задачи оценки начальной фазы радиосигнала обеспечивает выигрыш в 1,5 раза по числу используемых умножителей и в 10 раз по числу используемых сумматоров (для четырехэлементной АР) по сравнению с использованием алгоритма ПОС с обработкой в комплексных числах.
4. Применение алгоритма пространственной обработки в действительных числах в НАП с АР при воздействии маскирующей помехи обеспечивает такой же уровень подавления помех, что алгоритм ПОС с обработкой в комплексных числах.

Научная новизна результатов диссертационной работы состоит в следующем:

1. Синтезирован новый алгоритм фильтрации параметров навигационного радиосигнала и имитационной помехи в НАП с АР.
2. Получены статистические характеристики синтезированного алгоритма фильтрации параметров навигационного радиосигнала и имитационной помехи в НАП с АР.
3. Предложена новая форма представления процесса на выходе антенной решетки в действительной форме, отличающаяся от известных объединением в вектор квадратурных компонент процессов, который в дальнейшем используется для синтеза алгоритма пространственно-временной обработки в качестве векторных наблюдений.
4. Для задачи оценки начальной фазы навигационного радиосигнала в НАП с АР синтезирован новый пространственно-временной алгоритм обработки выходных сигналов антенной решетки в действительной форме.
5. Получены статистические характеристики синтезированного пространственно-временного алгоритма обработки выходных сигналов антенной решетки в действительной форме.

Практическая ценность работы. Разработанный алгоритм фильтрации параметров навигационного радиосигнала и имитационной помехи позволяет осуществлять надежное слежение за параметрами навигационного радиосигнала при наиболее вероятных значениях превышения мощности имитационной помехи над мощностью навигационного радиосигнала ($2 - 5\text{дБ}$).

Разработанный алгоритм пространственно-временной обработки сигналов в действительной форме позволяет существенно (1,5 раза по аппаратным умножителям и в 10 раз по числу сумматоров для четырехэлементной АР) снизить требования к аппаратным ресурсам вычислителя ПНАП по сравнению с алгоритмом в комплексной форме при одинаковом уровне подавления маскирующей помехи.

Реализация и внедрение результатов исследования

Результаты исследований использованы при выполнении:

НИР «Свертка» «Исследование методов и алгоритмов обработки перспективных навигационных сигналов и измерений в навигационной аппаратуре специальных потребителей», выполненной в рамках федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012 – 2020 годы».

Составной части ОКР «Высотка-28» «Разработка алгоритмического и программного обеспечения по обработке сигналов в радиационно-стойкой СБИС для построения многопозиционных радиоизмерительных систем фазовой пеленгации».

Составной части ОКР «Фарватер» «Разработка программного обеспечения модулей цифровой первичной обработки спутниковых навигационных сигналов модернизированной контрольно-корректирующей станции», выполненной в рамках федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012 – 2020 годы».

Достоверность и обоснованность результатов проведенных исследований обеспечена применением апробированного математического аппарата, применением стандартных математических методов статистики, близким соответствием расчетных результатов, имитационного моделирования и экспериментальных результатов.

Апробация. Результаты работы докладывались и обсуждались на двадцать второй и двадцать третьей международной НТК студентов и аспирантов «Радиотехника, электроника и энергетика» (Москва, 2016-2017 гг); на конференции «Радионавигационные технологии в приборостроении» (Анапа, 2017г); на московском семинаре по электронным и сетевым технологиям (MWENT-2018, Москва, 2018г); на международной молодежной конференции по радиоэлектронике, электротехнике и энергетике (REEPE-2019, Москва, 2019г), на конференции The 41st PIERS (Рим, 2019г).

Публикации. Материалы диссертационных исследований опубликованы в 13 печатных работах, в том числе: 3 статьи, входящие в перечень Высшей аттестационной комиссии; 4 статьи, входящие в базу данных Scopus; 2 Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, 2 статьи в трудах Российской конференции; 2 тезисов докладов. Кроме того материалы диссертационных исследований опубликованы в 3 отчётах по НИОКР.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 176

станицах машинописного текста (включая 9 страниц приложений), содержит 56 рисунков, 6 таблиц и список литературы из 107 наименований.

Личный вклад автора.

Лично соискателем получены следующие результаты:

1. Разработана имитационная модель и проведено имитационное моделирование оптимального алгоритма фильтрации параметров навигационного радиосигнала и имитационной помехи.
2. Получены общие математические соотношения по обращению блочных матриц в задаче оптимальной пространственно-временной обработки навигационных радиосигналов.
3. Проведен синтез оптимального алгоритма оценки начальной фазы навигационного радиосигнала по наблюдениям АР в действительной форме.
4. Разработана имитационная модель и проведено имитационное моделирование алгоритма ПОС в действительной форме.
5. Разработана методика оценки неидентичности частотных характеристик приемных трактов.

Совместно с научным руководителем Перовым А.И. выполнены постановка задачи и синтез алгоритма фильтрации параметров навигационного радиосигнала и имитационной помехи, постановка задачи алгоритма оценки начальной фазы навигационного радиосигнала по наблюдаемому процессу с АР в действительной форме. Совместно с сотрудниками УИЦ «Лаборатория навигационных систем» («НИУ «МЭИ»») проведено экспериментальное исследование упрощенного алгоритма ПОС в действительной форме.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обосновывается актуальность выбранной темы, формулируется цель работы и задачи исследования, определяется научная новизна и практическая ценность результатов, приводится обзор методов повышения помехоустойчивости НАП, поясняются понятия имитационной и маскирующей помех, рассматриваемых в диссертации.

В первой главе приводится модель наблюдаемого на выходе антенной решетки процесса при воздействии имитационной помехи, который представляет собой аддитивную смесь навигационного радиосигнала имитационной помехи и внутреннего шума приемника. Основные особенности этой модели:

описание процессов на выходе АР в виде векторных процессов;

модель навигационного радиосигнала без модуляции навигационным сообщением (соответствует пилотным компонентам перспективных навигационных радиосигналов с кодовым разделением);

модель имитационной помехи по структуре идентична модели навигационного радиосигнала;

направления прихода навигационного радиосигнала и имитационной помехи различны и известны, их амплитуды также известны.

Проведен синтез алгоритма фильтрации параметров (фазы и задержки огибающей) навигационного радиосигнала и имитационной помехи. В диссертации рассматривается упрощенный вариант синтеза, при котором проводится отдельный синтез систем фильтрации за фазами и задержками навигационного и помехового радиосигналов без объединения всех оцениваемых параметров в единый вектор состояния, т.к. получающийся при этом комплексный алгоритм фильтрации включает перекрестные связи между каналами оценки данных компонент и сложен в реализации.

В результате синтеза получен следующий алгоритм фильтрации фазы навигационного радиосигнала

$$\hat{\varphi}_k = \mathbf{c}\hat{\mathbf{x}}_k, \hat{\mathbf{x}}_k = \mathbf{F}\hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{K}u_{д,ф,k},$$

где $\mathbf{c} = [1 \ 0 \ 0]$, $\hat{\mathbf{x}}_k = [\hat{\varphi}_k \ \hat{\omega}_{доп,k} \ \hat{v}_k]^T$ — вектор оценок параметров навигационного радиосигнала на момент времени t_k , $\mathbf{K} = [K_1 \ K_2 \ K_3]^T$ — вектор весовых коэффициентов;

$$u_{д,ф,k} = \frac{2A}{N_0} \sum_{i=1}^M \left(\mathbf{y}(t_{k,i}) - \mathbf{s}_п(t_{k,i}, \tilde{\lambda}_{п,k}) \right)^T \mathbf{s}_{с,гарм}(t_{k,i}, \tilde{\varphi}_k, \tilde{\omega}_{доп,k}) h_{дк}(t_{k,i} - \tilde{\tau}_k) T_d \quad (1)$$

— дискриминатор фазы навигационного радиосигнала, в котором $\mathbf{y}(t_{k,i})$ — наблюдаемый с выхода АР процесс, $\mathbf{s}_п(t_{k,i}, \tilde{\lambda}_{п,k})$ — имитационная помеха с параметрами $\tilde{\lambda}_{п,k}$, $\mathbf{s}_{с,гарм}(t_{k,i}, \tilde{\varphi}_k, \tilde{\omega}_{доп,k})$ — вектор высокочастотных колебаний навигационного радиосигнала на антенных элементах (АЭ), $h_{дк}(t_{k,i} - \tilde{\tau}_k)$ — функция модуляции дальномерным кодом.

Алгоритм фильтрации задержки огибающей навигационного радиосигнала

$$\hat{\tau}_k = \tilde{\tau}_k + K_{\tau} u_{д,т,k},$$

где $\hat{\tau}_k$ — оценка задержки огибающей навигационного радиосигнала на момент времени t_k , $\tilde{\tau}_k = \hat{\tau}_{k-1} - \frac{\hat{\omega}_{доп,k-1}}{2\pi f_0} T$ — экстраполированное значение задержки огибающей навигационного радиосигнала, K_{τ} — весовой коэффициент фильтра задержки огибающей;

$$u_{д,т,k} = \frac{I_{E,k} - I_{L,k}}{\Delta\tau}$$

— дискриминатор задержки огибающей навигационного радиосигнала, в котором

$$I_{E,k} = \frac{2A}{N_0} \sum_{i=1}^M \left(\mathbf{y}(t_{k,i}) - \mathbf{s}_п(t_{k,i}, \tilde{\lambda}_{п,k}) \right)^T \times \times \mathbf{s}_{гарм}(t_{k,i}, \tilde{\varphi}_k, \tilde{\omega}_{доп,k}) h_{дк}(t_{k,i} - (\tilde{\tau}_k + \Delta\tau/2)) T_d, \quad (2)$$

$$I_{L,k} = \frac{2A}{N_0} \sum_{i=1}^M \left(\mathbf{y}(t_{k,i}) - \mathbf{s}_{\Pi}(t_{k,i}, \tilde{\boldsymbol{\lambda}}_{\Pi,k}) \right)^T \times \\ \times \mathbf{s}_{\text{Гарм}}(t_{k,i}, \tilde{\varphi}_k, \tilde{\omega}_{\text{доп},k}) h_{\text{ДК}}(t_{k,i} - (\tilde{\tau}_k - \Delta\tau/2)) T_{\text{Д}}. \quad (3)$$

Алгоритм фильтрации фазы помехового радиосигнала

$$\hat{\boldsymbol{\varphi}}_{\Pi,k} = \mathbf{c} \hat{\mathbf{x}}_{\Pi,k}, \hat{\mathbf{x}}_{\Pi,k} = \mathbf{F} \hat{\mathbf{x}}_{\Pi,k-1} + \mathbf{K}_{\Pi} u_{\text{д},\varphi_{\Pi},k},$$

где $\hat{\mathbf{x}}_{\Pi,k} = [\hat{\varphi}_{\Pi,k} \quad \hat{\omega}_{\text{доп},\Pi,k} \quad \hat{\nu}_{\Pi,k}]^T$ — вектор оценок параметров имитационной помехи на момент времени t_k , $\mathbf{K}_{\Pi} = [K_{\Pi,1} \quad K_{\Pi,2} \quad K_{\Pi,3}]^T$ — вектор весовых коэффициентов фильтра;

$$u_{\text{д},\varphi_{\Pi},k} = \frac{2A}{N_0} \sum_{i=1}^M \left(\mathbf{y}(t_{k,i}) - \mathbf{s}(t_{k,i}, \tilde{\boldsymbol{\lambda}}_k) \right)^T \times \\ \times \mathbf{s}_{\text{с,Гарм},\Pi}(t_{k,i}, \tilde{\varphi}_{\Pi,k}, \tilde{\omega}_{\text{доп},\Pi,k}) h_{\text{ДК}}(t_{k,i} - \tilde{\tau}_{\Pi,k}) T_{\text{Д}} \quad (4)$$

— дискриминатор фазы имитационной помехи.

Алгоритм фильтрации задержки имитационной помехи

$$\hat{\tau}_{\Pi,k} = \tilde{\tau}_{\Pi,k} + K_{\Pi,\tau} u_{\text{д},\tau_{\Pi},k},$$

где $\hat{\tau}_{\Pi,k}$ — оценка задержки огибающей имитационной помехи на момент времени t_k , $\tilde{\tau}_{\Pi,k} = \hat{\tau}_{\Pi,k-1} - \frac{\hat{\omega}_{\text{доп},\Pi,k-1}}{2\pi f_0} T$ — экстраполированное значение задержки огибающей имитационной помехи, $K_{\Pi,\tau}$ — весовой коэффициент фильтра задержки огибающей,

$$u_{\text{д},\tau_{\Pi},k} = \frac{I_{E,\Pi,k} - I_{L,\Pi,k}}{\Delta\tau}$$

— дискриминатор задержки огибающей имитационной помехи, в котором

$$I_{E,\Pi,k} = \frac{2A_{\Pi}}{N_0} \sum_{i=1}^M \left(\mathbf{y}(t_{k,i}) - \mathbf{s}(t_{k,i}, \tilde{\boldsymbol{\lambda}}_k) \right)^T \times \\ \times \mathbf{s}_{\text{Гарм},\Pi}(t_{k,i}, \tilde{\varphi}_{\Pi,k}, \tilde{\omega}_{\text{доп},\Pi,k}) h_{\text{ДК}}(t_{k,i} - (\tilde{\tau}_{\Pi,k} + \Delta\tau/2)) T_{\text{Д}}, \quad (5)$$

$$I_{L,\Pi,k} = \frac{2A_{\Pi}}{N_0} \sum_{i=1}^M \left(\mathbf{y}(t_{k,i}) - \mathbf{s}(t_{k,i}, \tilde{\boldsymbol{\lambda}}_k) \right)^T \times \\ \times \mathbf{s}_{\text{Гарм},\Pi}(t_{k,i}, \tilde{\varphi}_{\Pi,k}, \tilde{\omega}_{\text{доп},\Pi,k}) h_{\text{ДК}}(t_{k,i} - (\tilde{\tau}_{\Pi,k} - \Delta\tau/2)) T_{\text{Д}}. \quad (6)$$

Показано, что в синтезированном алгоритме производится оценка параметров навигационного радиосигнала и имитационной помехи, восстановление их формы на основе полученных оценок и перекрёстное вычитание (1) — (6) (компенсация) восстановленных «копий» в каналах обработки.

Проведен статистический анализ дискриминаторов фаз и задержек огибающих навигационного радиосигнала и имитационной помехи, который показал, что дискриминаторы имеют устойчивые точки равновесия, в которых оценки параметров равны их истинным значениям.

Приведены две, эквивалентные друг другу структурные схемы синтезированной системы фильтрации: с компенсацией до корреляторов и компенсацией после корреляторов. На Рисунке 1 приведена структурная схема синтезированного алгоритма фильтрации с компенсацией после корреляторов, как наиболее предпочтительная для реализации в НАП.

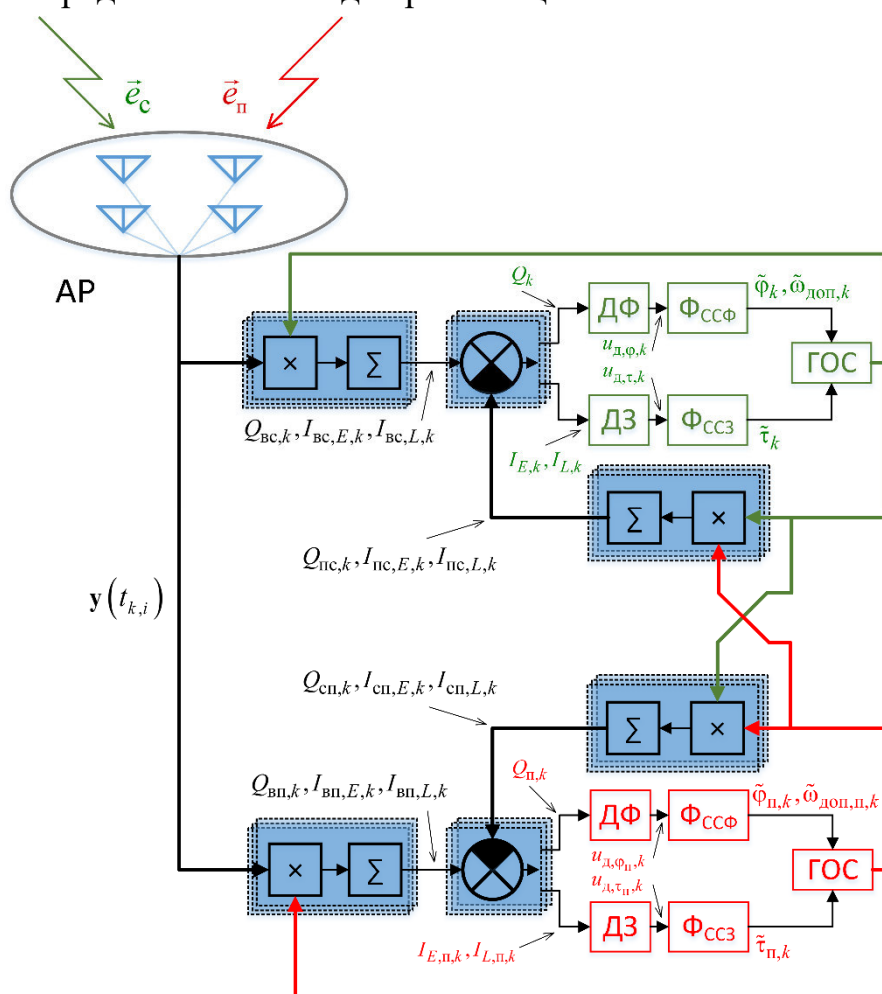


Рисунок 1. Структурная схема синтезированной системы фильтрации

Во второй главе приводятся описание имитационной модели синтезированного алгоритма фильтрации параметров навигационного радиосигнала и имитационной помехи и результаты имитационного моделирования.

Моделирование синтезированного алгоритма фильтрации проведено в сравнении со стандартным приемником, в котором применены широко известные алгоритмы обработки (в котором не производится оценка параметров имитационной помехи с компенсацией в канале оценки параметров навигационного радиосигнала).

Проводится анализ ошибок слежения за фазами и задержками огибающих навигационного радиосигнала и имитационной помехи в

синтезированном алгоритме фильтрации, который показал, что приемник с синтезированными алгоритмами не уступает в точности слежения за фазой и задержкой огибающей навигационного радиосигнала стандартному приемнику.

Исследовано влияние неопределенности знания амплитуд и направлений прихода навигационного радиосигнала и имитационной помехи. Результаты имитационного моделирования показывают, что в приемнике с синтезированными алгоритмами осуществляется надежное слежение за задержкой огибающей навигационного радиосигнала при превышении мощности имитационной помехи над мощностью навигационного радиосигнала до $J/S = 16 \text{ дБ}$. Зависимость вероятности срыва слежения в ССЗ по навигационному радиосигналу от отношения мощности имитационной помехи над мощностью навигационного радиосигнала представлен на Рисунке 2.

Учитывая, что на практике мощность имитационной помехи выбирается на $2 - 5 \text{ дБ}$ большей мощности навигационного радиосигнала, сделан вывод о том, что применение в НАП синтезированного алгоритма фильтрации параметров навигационного радиосигнала и имитационной помехи с предложенными алгоритмами оценки амплитуд навигационного радиосигнала и имитационной помехи обеспечивает надежное слежение за навигационным радиосигналом с вероятностью срыва близкой к нулю.

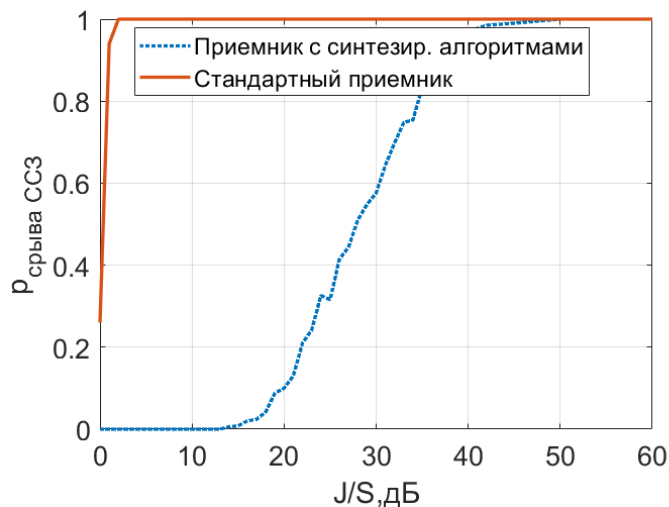


Рисунок 2. Зависимость вероятности срыва ССЗ по навигационному радиосигналу от отношения мощности имитационной помехи к мощности навигационного радиосигнала

В третьей главе приводится описание наблюдаемого на выходе АР процесса в действительной форме (как совокупность квадратурных компонент)

$$\tilde{y}_k = \begin{vmatrix} y_{I,k} \\ y_{Q,k} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} s_{I,k} \\ s_{Q,k} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} s_{п,I,k} \\ s_{п,Q,k} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} n_{I,k} \\ n_{Q,k} \end{vmatrix} \quad (7)$$

Приведен анализ корреляционной матрицы (КМ) помех и шумов для наблюдаемого процесса в действительной форме (7), который показал, что КМ обладает блочной структурой и свойствами симметрии

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{U}} & \tilde{\mathbf{V}} \\ \tilde{\mathbf{V}}^T & \tilde{\mathbf{U}} \end{bmatrix}, \tilde{\mathbf{U}} = \tilde{\mathbf{U}}^T, \tilde{\mathbf{V}} = -\tilde{\mathbf{V}}^T. \quad (8)$$

Приведены общие выражения для обратной КМ помех и шумов, которые показывают что обратная КМ аналогична по структуре прямой КМ (8) и также обладает свойствами симметрии

$$\mathbf{R}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{G} & \mathbf{Q} \\ \mathbf{Q}^T & \mathbf{G} \end{bmatrix}, \mathbf{G} = \mathbf{G}^T, \mathbf{Q} = -\mathbf{Q}^T. \quad (9)$$

Проведен синтез алгоритма оценки начальной фазы навигационного радиосигнала по наблюдаемому с АР процессу в действительной форме. Алгоритм оценки фазы разделяется на пространственную и временную обработки. Пространственная обработка в синтезированном алгоритме представляет собой весовое суммирование наблюдаемого процесса

$$\mathbf{y}_{\text{AP},k} = \begin{bmatrix} y_{\text{AP},I,k} \\ y_{\text{AP},Q,k} \end{bmatrix} = \mathbf{A}^T \mathbf{R}^{-1} \tilde{\mathbf{y}}_k = \boldsymbol{\beta} \tilde{\mathbf{y}}_k, \quad (10)$$

где матрица \mathbf{A} характеризует фазовое распределение навигационного радиосигнала по апертуре АР.

Структурная схема алгоритма пространственной обработки изображена на Рисунке 3.

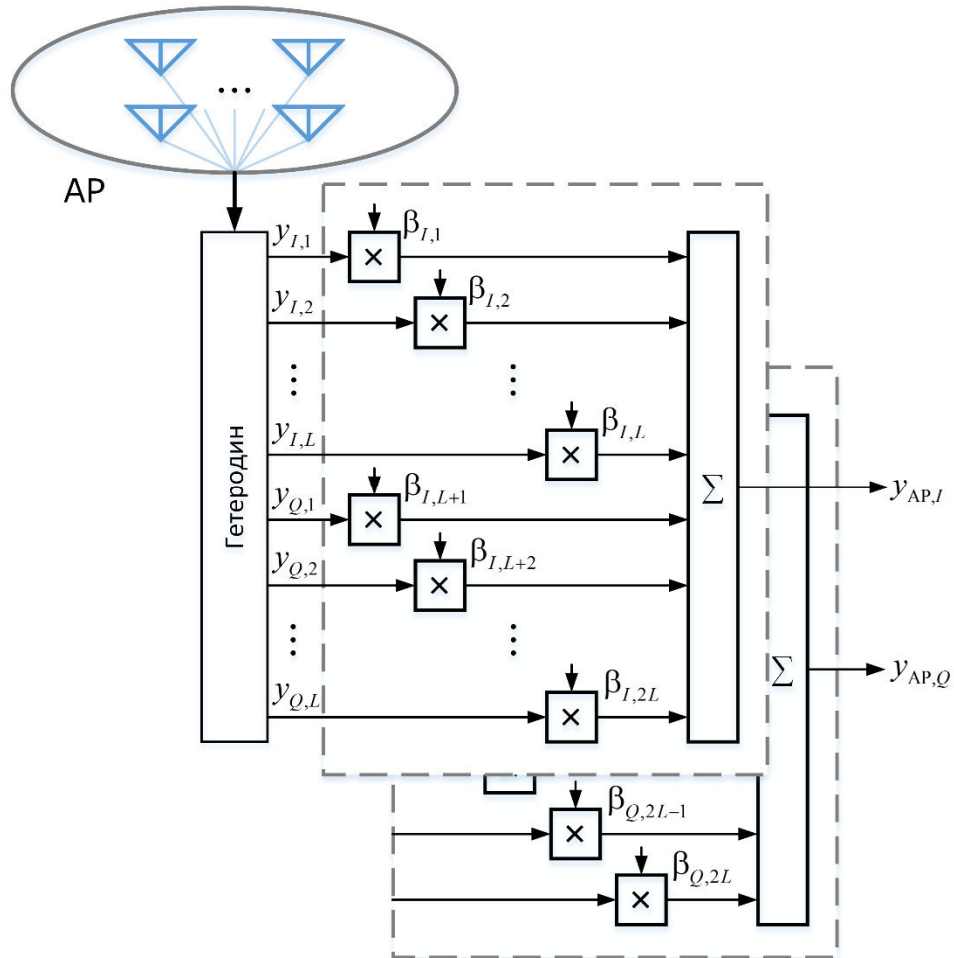


Рисунок 3. Структурная схема алгоритма пространственной обработки

Временная обработка в синтезированном алгоритме представляет собой корреляционную обработку процесса с выхода алгоритма ПОС

$$\hat{\phi}_0 =$$

$$-\arctg \left(\frac{\left(\sum_{k=1}^K h(t_k - \tau_3) \left(y_{AP,I,k} \sin((\omega_{пч} + \omega_{доп})t_k) - y_{AP,Q,k} \cos((\omega_{пч} + \omega_{доп})t_k) \right) \right)}{\left(\sum_{k=1}^K h(t_k - \tau_3) \left(y_{AP,I,k} \cos((\omega_{пч} + \omega_{доп})t_k) + y_{AP,Q,k} \sin((\omega_{пч} + \omega_{доп})t_k) \right) \right)} \right).$$

Проведено сравнение синтезированного алгоритма обработки в действительной форме с известным алгоритмом обработки в комплексной форме. Показано, что отличие алгоритмов ПОС в действительной и комплексной формах заключается в алгоритмах получения весовых коэффициентов. Выражения для алгоритмов временной обработки в этих случаях совпадают с точностью до обозначений.

В четвертой главе описывается имитационная модель синтезированного алгоритма ПОС в действительной форме; приводятся характеристики алгоритма ПОС при известной корреляционной матрице и при её оценивании в сравнении с алгоритмом ПОС в комплексной форме. На примере модели четырехэлементной антенной решетки с синтезированным алгоритмом ПОС проведен ряд экспериментов в сравнении с алгоритмом в комплексной форме. При этом использовался показатель качества, называемый коэффициентом эффективности (КЭ), под которым понимается отношение сигнал/(помеха+шум) на выходе алгоритма пространственной обработки в АР к аналогичному отношению на входе АР.

Результаты имитационного моделирования показывают, что алгоритмы ПОС в действительной и комплексной формах показывают одинаковый КЭ. На Рисунке 4 представлена зависимость КЭ от уровня помехи на выходе АЭ.

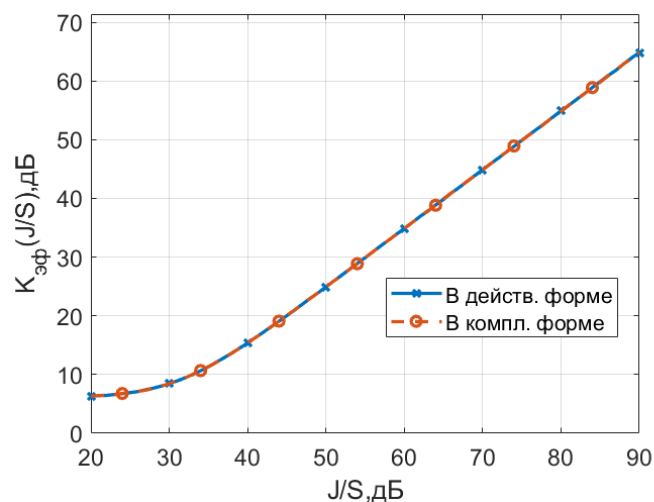


Рисунок 4. Зависимость коэффициента эффективности от уровня помехи в алгоритмах ПОС

На Рисунке 5 представлена зависимость КЭ от количества одновременно воздействующих на АР помех, приходящих с несовпадающих направлений, из

которой следует, что алгоритмы ПОС в действительной и комплексной формах показывают одинаковую эффективность подавления помех.

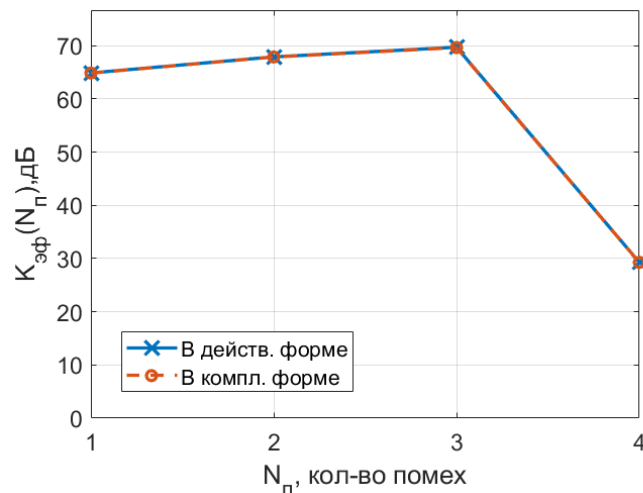


Рисунок 5. Зависимость коэффициента эффективности от количества одновременно воздействующих на АР помех в алгоритмах ПОС

Приведены результаты моделирования алгоритма ПОС с использованием оценки КМ. При оценивании КМ с использованием выборки $M \geq 500$ отсчетов эффективность подавления помех не изменяется (при воздействии трех пространственно разнесенных помех на четырехэлементную АР).

Приведено исследование влияния квантования наблюдаемого процесса на характеристики алгоритма ПОС. При этом даны рекомендации к требуемой разрядности АЦП для достижения заданного значения КЭ. Так, например, для помехи уровнем $J/S = 90 \text{ дБ}$ необходимо использовать АЦП с разрядностью $N_{\text{АЦП}} \geq 14 \text{ бит}$.

В пятой главе описывается макет помехоустойчивой НАП, приводится методика оценки и оцениваются характеристики макета.

В макете реализован (на ПЛИС) упрощенный алгоритм ПОС в действительных числах, в котором используется весовое суммирование только синфазных компонент наблюдаемого процесса и который реализован в аппаратуре по ОКР «Высотка-28». Упрощение алгоритма ПОС приводит к потере эффективности подавления при одновременном воздействии нескольких помех вследствие формирования «ложных» провалов диаграммы направленности АР.

Разработана методика оценки характеристик радиочастотного блока НАП для определения достижимых характеристик подавления помех.

В макете достигнуты следующие значения коэффициента подавления помехи (КПП), определяемого как отношение мощность процесса на входе алгоритма обработки к мощности процесса на выходе алгоритма обработки: $K_{\text{П}} = 57 \text{ дБ}$ для гармонической помехи, $K_{\text{П}} = 51 \text{ дБ}$ для шумовой полосовой помехи ($\Delta F = 15 \text{ МГц}$), $K_{\text{П}} = 52 \text{ дБ}$ для ФМн-помехи ($\Delta F = 1 \text{ МГц}$).

Проведен расчет затрат на аппаратные ресурсы при реализации трех алгоритмов: в действительной форме, в комплексной форме, упрощенный в

действительной форме. Показано, что для четырехэлементной АР использование алгоритма ПОС с обработкой в действительных числах дает выигрыш в 1,5 раза по числу используемых умножителей и в 10 раз по числу используемых сумматоров по сравнению с использованием алгоритма ПОС с обработкой в комплексных числах. Данное преимущество сохраняется при использовании в НАП с АР многоотводных линий задержек.

В Заключении сформулированы основные научные и практические результаты работы.

В Приложении 1 приводится синтез алгоритма оценки начальной фазы навигационного радиосигнала в НАП с АР по наблюдаемому с АР процессу в комплексной форме. В Приложении 2 приводятся результаты расчета коэффициента подавления алгоритмов ПОС в действительной и комплексной формах на имитационной модели. В Приложении 3 приводятся результаты имитационного моделирования упрощенного алгоритма ПОС в действительной форме.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Методами теории оптимальной фильтрации синтезирован новый алгоритм фильтрации параметров (фаз и задержек огибающих) навигационного радиосигнала и имитационной помехи в НАП с АР. Показано, что в синтезированном алгоритме реализуется принцип компенсации имитационной помехи в следящих системах за параметрами навигационного радиосигнала и компенсация навигационного радиосигнала в следящих системах за параметрами имитационной помехи

3. Приведены две, эквивалентные друг другу, структурные схемы синтезированной системы — с компенсацией «мешающих» сигналов до корреляторов и компенсацией после корреляторов, на которых показаны две ветви, в которых производится фильтрация параметров навигационного радиосигнала и имитационной помехи. Показано, что структурная схема с компенсацией после корреляторов более предпочтительна для реализации.

4. Разработана имитационная модель и проведено имитационное моделирование приемника с синтезированными алгоритмами фильтрации параметров навигационного радиосигнала и имитационной помехи, а также стандартного приемника, осуществляющего слежение только за параметрами навигационного радиосигнала.

Показано, что при оценке амплитуд и погрешности знания направлений прихода с СКО $\sigma_\theta = 3^\circ$ навигационного радиосигнала и имитационной помехи надежное слежение (с вероятностью срыва, не превышающей 0,02) за параметрами навигационного радиосигнала в этом случае обеспечивается при мощностях имитационной помехи и навигационного радиосигнала, характеризующихся $J/S \leq 16 \text{ дБ}$.

Показано, что в стандартном приемнике слежение за параметрами навигационного радиосигнала при воздействии имитационной помехи обеспечивается лишь при энергетическом отношении $J/S < 2 \text{ дБ}$.

Следовательно, в синтезированном алгоритме фильтрации обеспечивается повышение энергетической эффективности (в указанном выше смысле) слежения за навигационным радиосигналом на 14дБ .

Учитывая, что на практике мощность прицельной имитационной помехи на выходе выбирается выше мощности навигационного радиосигнала на $2-5\text{дБ}$ ($J/S = 2-5\text{дБ}$), сделан вывод о том, что применение в НАП синтезированного алгоритма фильтрации параметров навигационного радиосигнала и имитационной помехи с предложенными алгоритмами оценки амплитуд навигационного радиосигнала и имитационной помехи и дополнительными данными о направлении прихода помехового сигнала с погрешностью (СКО) $\sigma_\theta \leq 3^\circ$, обеспечивает надежное слежение за навигационным радиосигналом с вероятностью срыва близкой к нулю.

5. Приведено оригинальное описание сигналов на выходах антенных элементов АР в действительной форме с использованием квадратурных составляющих. Для данного описания рассмотрена корреляционная матрица суммы помех и шумов, для которой показано, что она имеет блочную структуру с блоками, обладающими свойствами симметрии. Приведены выражения для обратной корреляционной матрицы помех и шумов и показано, что она имеет с структуру, аналогичную структуре исходной матрицы, а, именно, представляет из себя блочную матрицу с блоками, обладающими свойствами симметрии.

6. Применительно к задаче оценки начальной фазы навигационного радиосигнала в НАП с АР проведен синтез оптимального алгоритма обработки в действительной форме, который включает пространственную и временную обработки. Пространственная обработка заключается в весовом суммировании квадратурных компонент с каждого АЭ с учетом направлений прихода навигационного и помехового радиосигналов. Сформированные в результате такой обработки квадратурные компоненты используются далее в алгоритме временной обработки, результат которой представляет собой оценку фазы навигационного радиосигнала.

7. Проведено сравнение синтезированного алгоритма пространственной обработки (ПОС) в действительной форме с известным алгоритмом обработки в комплексной форме. Показано, что алгоритмы ПОС в действительной и комплексной формах по сути представляют собой весовое суммирование квадратурных компонент наблюдаемого процесса, но отличаются формой представления математических операций и алгоритмами вычисления весовых коэффициентов.

8. Разработана имитационная модель и проведено имитационное моделирование алгоритма пространственной обработки сигналов в действительной форме в сравнении с алгоритмом пространственной обработки сигналов в комплексной форме.

Проведено сравнение алгоритмов в действительной и комплексной формах по коэффициенту эффективности (КЭ), под которым понимается отношение сигнал/(помеха+шум) на выходе алгоритма пространственной

обработки в АР к аналогичному отношению на входе АР. Показано, что как алгоритм в действительной форме, так и в комплексной форме подавляют помеху с одинаковым КЭ. На примере четырехэлементной антенной решетки показано, что оба алгоритма (в действительной и комплексной формах) при воздействии трех и менее помех подавляют их с одинаковым КЭ.

9. Создана экспериментальная установка для оценки эффективности алгоритмов ПОС в НАП с АР. Разработана методика оценки характеристик РЧБ для определения достижимых характеристик подавления помех.

12. Проведен расчет затрат на аппаратные ресурсы при реализации трех алгоритмов: в действительной форме, в комплексной форме, упрощенный в действительной форме. Показано, что для четырехэлементной АР использование алгоритма ПОС с обработкой в действительных числах дает выигрыш в 1,5 раза по числу используемых умножителей и в 10 раз по числу используемых сумматоров по сравнению с использованием алгоритма ПОС с обработкой в комплексных числах. Данное преимущество сохраняется при использовании в НАП с АР многоотводных линий задержек.

13. Экспериментально подтверждена эффективность подавления помех в НАП с АР при использовании алгоритмов ПОС с обработкой в действительных числах и выигрыш в вычислительных затратах при реализации такого алгоритма.

14. Упрощенный алгоритм ПОС с обработкой в действительных числах с использованием многоотводных линий задержек реализован в ОКР «Высотка-28», посвященной созданию микросхемы для построения многопозиционных радиоизмерительных систем фазовой пеленгации, а также в ОКР «Фарватер», посвященной созданию помехоустойчивой контрольно-корректирующей станции дифференциальных поправок.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Перов А.И., Ипполитов С.П., Синтез и анализ эффективности компенсационного алгоритма фильтрации при воздействии имитационных помех // Радиотехника. М.: Радиотехника, 2017. № 11. С. 4-8 (0,3 п.л. / 0,2 п.л.).

2. Перов А. И., Ипполитов С. П., Исследование алгоритма оценивания параметров сигнала с пространственно-временной обработкой наблюдений с антенной решеткой в действительных числах // Радиотехника. М.: Радиотехника, 2018. № 9. С. 139-144 (0,4 п.л. / 0,2 п.л.).

3. Перов А.И., Ипполитов С.П., Синтез и сравнительный анализ алгоритмов пространственной обработки сигналов и помех в комплексной и действительной формах в аппаратуре спутниковой навигации // Радиотехника. М.: Радиотехника, 2019. №9(14). С.14-22 (0,6 п.л. / 0,3 п.л.).

4. Ипполитов С.П., Перов А.И., Программа для исследования компенсационного алгоритма фильтрации параметров навигационного сигнала при воздействии имитационной помехи. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019666289 от 06.12.2019. РОСПАТЕНТ.

5. Ипполитов С.П., Перов А.И., Программа для исследования алгоритма пространственно-временной обработки сигналов антенной решетки в действительной форме. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019666290 от 06.12.2019. РОСПАТЕНТ.
6. Перов А.И., Ипполитов С.П. Моделирование компенсационного алгоритма фильтрации параметров полезного сигнала при воздействии имитационной помехи// Радионавигационные технологии в приборостроении. Сборник материалов Научно-технической конференции за 2017 г.(г. Анапа), 2018. Вып. 7. С. 13-16 (0,3 п.л. / 0,2 п.л).
7. Перов А.И., Ипполитов С.П. Синтез и моделирование алгоритма оценивания параметров сигнала с пространственно-временной обработкой в действительных числах // Радионавигационные технологии, 2018. Вып.7, С. 7-12 (0,4 п.л. / 0,2 п.л).
8. Perov A.I., Ippolitov S.P. Synthesis of an algorithm of space-time processing received satellite navigation signal and spoofing jamming Journal of Siberian Federal University - Mathematics and Physics 10 (4) , 2017, p. 429-442 (0,9 п.л. / 0,4 п.л).
9. Perov, A.I., Ippolitov, S.P. Synthesis and analysis of signal parameters estimation algorithm with space-time processing in real numbers operating by antenna array observations. 2018 MWENT. Proceedings. NRU HSE, Moscow, Russia, March 14–16, 2018. DOI: 10.1109/MWENT.2018.8337287, Author ID: 57197832088, 6 p (0,4 п.л. / 0,3 п.л).
10. Perov, A.I., Ippolitov, S.P. Comparative analysis of space-time processing algorithms for GNSS receivers. Proceedings of the 1st IEEE 2019 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2019 8708767. Author ID: 57197832088, 4 p (0,3 п.л. / 0,2 п.л.).
11. Ilya V. Korogodin , Sergey P. Ippolitov , Ivan V. Lipa, Adaptive Beamforming Algorithm in Real Numbers Arithmetic. 2019 PIERS-Spring. DOI: 10.1109/PIERS-Spring46901.2019.9017247. Author ID: 57197832088, 6 p (0,5 п.л. / 0,2 п.л).
12. Ипполитов, С.П., Перов, А.И. Исследование влияния неидентичности приемных трактов на коэффициент подавления антенного подавителя помех НАП СРНС // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Двадцать вторая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов : Тез. докл. В 3 Т. М.: Издательский дом МЭИ, 2016. Т. 1. С. 100 (0,03 п.л. / 0,03 п.л).
13. Ипполитов, С.П., Перов, А.И. Исследование изменения параметров полезного сигнала при прохождении через структуру антенного подавителя помех НАП СРНС // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Двадцать третья междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тезисы докладов. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. Т. 1. С. 99 (0,03 п.л. / 0,03 п.л).