Камнев Евгений Анатольевич. Радиоподавление помехозащищенной навигационной аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем в интересах объектово-территориальной защиты: автореферат дис. ... кандидата Технических наук: 05.12.14 / Камнев Евгений Анатольевич;[Место защиты: ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»], 2018

**МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)**

**Камнев Евгений Анатольевич**

**Радиоподавление помехозащищенной навигационной аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем в интересах объектово-территориальной защиты**

**Специальность 05.12.14 - «Радиолокация и радионавигация»**

**Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук**

**Научный руководитель д.т.н., профессор Юдин Василий Николаевич**

**Москва - 2018**

**Содержание**

1. **Описательная модель навигационной аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем как объекта радиоподавления 10**

**.1 Принципы функционирования спутниковых радионавигационных систем 10**

**.2 Организация доступа в систему 10**

[**.3 Характеристики сигналов спутниковой радионавигационной системы gps 11**](#bookmark5)

[**.4 Построение и функционирование навигационной аппаратуры потребителей 14**](#bookmark8)

[**.4.1 Структура навигационной аппаратуры потребителей 14**](#bookmark10)

[**.4.2 Алгоритмы обработки навигационного сигнала 17**](#bookmark14)

[**.5 Помехозащита навигационной аппаратуры потребителей 22**](#bookmark21)

[**.5.1 Основные виды преднамеренных помех 22**](#bookmark23)

[**.5.2 Способы защиты от маскирующих помех 25**](#bookmark25)

[**.5.3 Способы защиты от имитирующих (интеллектуальных) помех 27**](#bookmark27)

[**.6 Выводы по разделу 1 32**](#bookmark29)

1. **Определение характеристик противонавигационного поля радиопомех 34**
   1. **Требования к характеристикам противонавигационного поля радиопомех 34**
   2. [**Условие подавления и показатели качества подавления навигационной аппаратуры потребителей в различных режимах 39**](#bookmark37)
      1. [**Показатели качества подавления в различных режимах функционирования навигационной аппаратуры потребителей 41**](#bookmark40)
   3. **Условие радиоподавления навигационной аппаратуры потребителей с учетом внутрисистемных факторов и средств помехозащиты 65**
      1. [**Учет действия собственного шума и внутрисистемных помех 66**](#bookmark80)
      2. **Учет действия средств помехозащиты 72**
   4. [**Расчетные характеристики противонавигационного поля радиопомех, создаваемого для противодействия навигационной аппаратуре потребителей спутниковых радионавигационных систем 84**](#bookmark95)
      1. [**Условие радиоподавления навигационной аппаратуры потребителя в пределах противонавигационного поля радиопомех 84**](#bookmark97)
      2. [**Требуемая плотность потока мощности поля радиопомех в пределах противонавигационного поля радиопомех 85**](#bookmark99)
      3. [**Требуемая мощность постановщиков активных помех, действующих в составе противонавигационного поля радиопомех 88**](#bookmark103)
      4. [**Требуемая мощность одиночного постановщика активных помех и дальность подавления**](#bookmark111)

**навигационной аппаратуры потребителей 92**

[**2.5 Выводы по разделу 2 94**](#bookmark118)

1. **Помехоустойчивость адаптивных антенных решеток в условиях действия пространственно- распределенной системы постановщиков активных помех 98**
   1. **Модель адаптивной антенной решетки 98**
   2. [**Краткое описание компьютерной имитационной модели адаптивной антенной решетки ...101**](#bookmark122)
   3. **Модельный эксперимент по оценке эффективности адаптивной антенной решетки как средства помехозащиты навигационной аппаратуры потребителей 102**
      1. [**Общие параметры модельного эксперимента 103**](#bookmark128)
      2. **Анализ помехоустойчивости четырехэлементной адаптивной антенной решетки методом модельного эксперимента 105**
      3. [**Анализ помехоустойчивости семиэлементной адаптивной антенной решетки методом модельного эксперимента 117**](#bookmark153)
   4. [**Предложения по рациональному построению противонавигационного поля радиопомех при противодействии навигационной аппаратуры потребителей, оснащенной адаптивными антенными решетками 135**](#bookmark176)
      1. [**Построение противонавигационного поля радиопомех на базе постановщиков активных помех наземного базирования 136**](#bookmark178)
      2. **Построение противонавигационного поля радиопомех на базе постановщиков активных помех воздушного базирования 137**
      3. **Построение противонавигационного поля радиопомех на базе постановщиков активных помех наземного и воздушного базирования 138**
   5. **Выводы по разделу 3 138**
2. **Оценка зон радиоподавления навигационной аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем, оснащенных адаптивными антенными решетками 140**
   1. **Имитационная модель сценария радиоподавления навигационной аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем 140**
   2. [**Эксперимент по определению зон радиоподавления навигационной аппаратуры потребителей 142**](#bookmark190)
      1. [**Общие параметры модельного эксперимента 142**](#bookmark193)
      2. [**Оценка зон радиоподавления навигационной аппаратуры потребителей с**](#bookmark195)[**четырехэлементной адаптивной антенной решеткой для конфигурации противонавигационного**](#bookmark195)[**поля радиопомех с расстановкой вида «квадрат» 144**](#bookmark195)
      3. [**Оценка зон радиоподавления навигационной аппаратуры потребителей с семиэлементной**](#bookmark203)[**адаптивной антенной решеткой для конфигурации противонавигационного поля радиопомех с**](#bookmark203)

**расстановкой вида «квадрат» 149**

* 1. [**Выводы по разделу 4 152**](#bookmark209)

**Заключение 153**

[**Список сокращений и условных обозначений 154**](#bookmark211)

[**Список литературы 156**](#bookmark213)

**ВВЕДЕНИЕ**

**Актуальность работы. Наблюдаемое в настоящее время и на перспективу бурное разви­тие спутниковых радионавигационных систем (СРНС) стимулируется потребностями граждан­ской сферы и обороны. В интересах обороны наряду с развитием собственных СРНС актуально создание идеологии техники противодействия СРНС противной стороны. Противодействие реа­лизуется средствами радиоэлектронной борьбы (РЭБ), конкретно средствами радиоподавления (РП). Цель противодействия - затруднение решения задач определения своих координат и пара­метров движения опасными объектами противной стороны. К опасным объектам, использующим информацию от СРНС, можно отнести ударные и разведывательные самолеты различных типов, крылатые ракеты и управляемые авиационные бомбы, разведывательные и ударные беспилотные летательные аппараты (БЛА) и другие. Противодействие реализуется в интересах защиты граж­данских объектов (населенных пунктов, промышленных предприятий, электростанций, мостов, аэродромов и других), а также военных объектов от средств разведки и поражения, решающих задачи своего местоопределения и наведения оружия с использованием средств спутниковой навигации.**

**Традиционно принято считать, что недостатком СРНС является низкая помехоустойчи­вость навигационной аппаратуры потребителей (НАП) по отношению к воздействию маскирую­щих (например, шумовых или сигналоподобных), а также дезинформирующих (интеллектуаль­ных) радиопомех. Помехоустойчивость определяется способностью НАП определять собствен­ные координаты и вектор скорости в условиях действия радиопомех. Однако в настоящее время и на перспективу ситуация, характеризуемая низкой помехоустойчивостью НАП СРНС, ради­кально меняется. Это связано с внедрением в технику НАП различных средств помехозащиты, основанных, в частности, на адаптивной пространственно-временной и частотно-временной об­работке навигационных сигналов и помех, а также на аппаратно-программных методах защиты от дезинформирующих помех.**

**Проблеме разработки способов защиты НАП СРНС от воздействия маскирующих и дез­информирующих помех посвящена обширная литература** [**[1**](#bookmark215)[**-29]**](#bookmark242)**. Наиболее перспективным направлением развития средств защиты от маскирующих радиопомех является разработка антен­ных решеток (АР) с адаптивной пространственно-временной обработкой сигналов, реализующих операции пространственной режекции (или компенсации) помех и фокусировки диаграммы направленности (ДН) антенной решетки на рабочие спутники. В иностранной литературе по этим вопросам широко используется термин «beamformer» - формирователь лучей. Адаптивный фор­мирователь лучей обеспечивает фокусировку ДН в направлении сопровождаемого навигацион­ного спутника Земли (НСЗ) и формирование «провалов» в ДН в направлении постановщиков ак­тивных помех (ПАП) (пространственную режекцию помех).**

**Радикальность перемен с помехоустойчивостью НАП СРНС подтверждают результаты натурного эксперимента по радиоподавлению НАП СРНС с адаптивной антенной решеткой (ААР) (изделие «КОМЕТА»), установленной на малоразмерном БЛА «Грифон-12К». Экспери­мент показал, что БЛА способен в штатном режиме определять свои текущие координаты и век­тор скорости при работе на удалении вплоть до 2 км от мест размещения специализированных ПАП, имеющих энергопотенциал до 10 кВт** [**[30]**](#bookmark243)**.**

**Обсуждаемое выше внедрение в технику НАП СРНС перспективных средств помехоза- щиты резко снижает эффективность одиночных систем и комплексов РЭБ и повышает требова­ния к энергетическим и технико-экономическим затратам на создание противонавигационного поля радиопомех (ПНПР) в интересах объектово-территориальной защиты. В связи с этим при­обретает особую актуальность разработка усовершенствованных способов и средств создания ПНПР, позволяющих ослабить указанный негативный эффект.**

**Настоящая диссертационная работа посвящена решению актуальной задачи разработки усовершенствованных способов создания и оценки эффективности противонавигационного поля радиопомех, обеспечивающего радиоподавление помехозащищенных образцов НАП СРНС в ин­тересах объектово-территориальной защиты.**

**Цель работы - повышение эффективности пространственно-распределенных систем РЭБ, формирующих противонавигационное поле радиопомех в интересах объектово-территори­альной защиты, в условиях действия помехозащищенных образцов НАП, оснащенных адаптив­ными антенными решетками, за счет совершенствования состава, пространственного размеще­ния и параметров постановщиков помех.**

**В диссертационной работе в качестве объекта исследования рассматривается простран­ственно-распределенная система постановщиков активных радиопомех, создающих противона- вигационное поле радиопомех в интересах объектово-территориальной защиты.**

**Предметом исследования является помехоустойчивость НАП СРНС, оснащенной сред­ствами адаптивной пространственно-временной обработки сигналов, в условиях действия про­странственно-распределённой системы постановщиков активных радиопомех.**

**Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:**

1. **Разработка описательной модели помехозащищенной НАП СРНС как объекта ра­диоподавления.**
2. **Разработка методики определения энергетических характеристик ПНПР и оценки коэффициентов подавления помехозащищенной НАП с учетом действия средств помехозащиты, режимов работы НАП, внутрисистемных факторов и структуры помеховых сигналов.**
3. **Разработка компьютерных имитационных моделей ААР, используемых в составе НАП СРНС.**
4. **Проведение модельных экспериментов по оценке помехоустойчивости НАП, осна­щенной ААР, в условиях действия пространственно-распределенной системы (ПРС) ПАП.**
5. **Разработка компьютерной имитационной модели сценария радиоподавления НАП, оснащенной ААР.**
6. **Проведение модельных экспериментов по оценке зон радиоподавления помехоза­щищенной НАП.**
7. **Анализ результатов экспериментов и формирование предложений по построению**

**ПНПР.**

**Методы исследований. При решении перечисленных задач были использованы методы математического анализа, теории вероятностей, математической статистики, компьютерного имитационного моделирования.**

**Научная новизна:**

1. **Предложена методика определения энергетических характеристик ПНПР и расчета коэффициентов подавления НАП, отличающаяся учетом действия средств помехозащиты, режи­мов работы НАП, внутрисистемных факторов и структуры помеховых сигналов.**
2. **Разработаны оригинальные математические и компьютерные имитационные мо­дели (КИМ) ААР, ориентированные на оценку помехоустойчивости НАП в условиях действия ПРС ПАП.**
3. **Получены количественные оценки помехоустойчивости четырехэлементной и се­миэлементной ААР (ААР4 и ААР7), находящихся под воздействием ПРС ПАП с элементами наземного и воздушного базирования.**
4. **Предложен способ создания ПНПР в интересах объектово-территориальной за­щиты, защищенный патентом РФ №2581602 от 25 марта 2016 г., позволяющий уменьшить плот­ность расстановки ПАП в глубине защищаемой территории (вокруг объекта защиты) за счет со­здания высокоэнергетической барьерной зоны на границе защищаемой территории и учета ре­жимов работы НАП.**
5. **Разработана оригинальная КИМ сценария радиоподавления помехозащищенной НАП, позволяющая оценивать эффективность существующих и перспективных ПРС ПАП, со­здаваемых в интересах объектово-территориальной защиты.**
6. **Получены ранее неизвестные количественные оценки зон радиоподавления поме­хозащищенной НАП для различных конфигураций ПРС ПАП.**

**Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные результаты работы могут быть использованы при разработке ПРС РЭБ, предназначенных для радиоподавления НАП СРНС, а также в интересах разработки помехозащищенных образцов НАП. Методики расчета коэффициентов подавления и требуемой энергетики ПАП, а также результаты оценки помехо­устойчивости ААР могут быть использованы при разработке способов применения существую­щих средств и комплексов РЭБ в интересах радиоподавления помехозащищенной НАП. Мето­дика расчета требуемой мощности ПАП, действующих в составе ПРС, а также разработанная КИМ сценария радиоподавления НАП, оснащенной ААР, могут быть использованы для оценки эффективности ПРС РЭБ, создаваемых в интересах объектово-территориальной защиты, на этапе планирования до непосредственного развертывания на местности, а также для выработки пред­ложений по повышению их эффективности (увеличению зон радиоподавления, сокращению тре­буемого количества модулей радиопомех в составе постов радиопомех, уменьшению плотности расстановки постов радиопомех на местности).**

**К наиболее существенным результатам диссертационной работы, полученным автором лично, относятся следующие. Разработаны методика определения энергетических характери­стик ПНПР с учетом средств помехозащиты, режимов работы НАП, внутрисистемных факторов и структуры помеховых сигналов, математические и компьютерные имитационные модели ААР. Проведены модельные эксперименты и получены количественные оценки помехоустойчивости рассмотренных ААР. Разработана компьютерная имитационная модель сценария радиоподавле­ния помехозащищенной НАП и проведены модельные эксперименты, в результате которых по­лучены количественные оценки зон радиоподавления помехозащищенной НАП. Сформулиро­ваны предложения по построению ПНПР в интересах объектово-территориальной зашиты.**

**Внедрение научных результатов. Результаты диссертационной работы использованы на предприятии АО «НТЦ РЭБ» при разработке программного обеспечения программно-аппарат­ного комплекса в ОКР «Плазма», проведении испытаний модуля радиопомех СРНС в составной части ОКР «Поле-48», а также комплекса РЭБ с малоразмерными БЛА «Репеллент», что подтвер­ждено соответствующим актом внедрения.**

**Достоверность полученных результатов подтверждена корректным применением ма­тематического аппарата, результатами компьютерного имитационного моделирования и поли­гонного эксперимента, соответствием результатов диссертационной работы, в частных случаях, известным результатам.**

**Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике - 2015» (Москва, МАИ, 2015 г.), XLII международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения - 2016» (Москва, МАИ, 2016 г.), научно-технической секции №6 «Пространственно-распределен­ная и роботизированная техника РЭБ» (Москва, 2017 г.), международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения - 2016» (Москва, МАИ, 2017 г.), Ш-й военно-научной конфе­ренции «Перспективы развития и применения комплексов с беспилотными летательными аппа­ратами» (г. Кубинка, Московская область, 2018 г.), научно-техническом семинаре «Развитие научной школы РЭБ на базе ЦНИРТИ» (Москва, 2018 г.).**

**Публикация результатов. Основные результаты диссертации опубликованы в двена­дцати работах, семь из которых опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК для опубли­кования основных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата наук. В ходе диссертационной работы получен патент РФ №2581602 на изобретение «Способ радиоэлектрон­ного подавления аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем в пределах защищаемой территории». Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений РФ 25 марта 2016 г.**

**Положения, выносимые на защиту:**

1. **Учет режимов работы навигационной аппаратуры потребителя и внутрисистемных факторов при организации противонавигационного поля радиопомех в интересах объектово-тер­риториальной защиты позволяет уменьшить требуемый коэффициент подавления навигацион­ной аппаратуры потребителя до 7 дБ и более.**
2. **Радиоподавление навигационной аппаратуры потребителя воздушного базирова­ния, оснащенной адаптивными антенными решетками, обеспечивается совокупностью простран­ственно-распределенных постановщиков активных помех, при этом для радиоподавления аппа­ратуры потребителя с четырёхэлементной адаптивной антенной решеткой требуется не менее четырех постановщиков активных помех наземного и/или воздушного базирования, а для радио­подавления аппаратуры потребителя с семиэлементной адаптивной антенной решеткой необхо­димо не менее семи постановщиков активных помех, из которых не менее одного - воздушного базирования.**
3. **Предложенное построение противонавигационного поля радиопомех, предполага­ющее создание высокоэнергетической барьерной зоны вдоль границы защищаемой территории, позволяет увеличить шаг расстановки постов радиопомех в глубине защищаемой территории до двух раз.**

**Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заклю­чения и списка литературных источников. Диссертация содержит 160 страниц текста, 80 рисун­ков, 23 таблицы и список литературных источников, включающий 59 наименований.**

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

**В ходе проведения диссертационного исследования получены следующие основные ре­зультаты:**

1. **Предложена методика определения энергетических характеристик ПНПР в интере­сах решения задач объектово-территориальной защиты и расчета коэффициентов подавления НАП СРНС, отличающаяся учетом действия средств помехозащиты, режимов работы НАП и внутрисистемных факторов СРНС.**
2. **Разработаны КИМ ААР, ориентированные на оценку помехоустойчивости помехо­защищенной НАП в условиях действия ПРС ПАП и получены количественные оценки помехо­устойчивости ААР4 и ААР7 в условиях действия ПРС ПАП, на базе которых сформулированы требования к ПНПР в интересах противодействия помехозащищенной НАП.**
3. **Предложена конфигурация ПНПР с высокоэнергетической барьерной зоной на гра­ницах защищаемой территории, которая позволяет за счет учета режимов работы НАП умень­шить плотность расстановки ПАП в глубине защищаемой территории (вокруг объекта защиты) до двух раз по сравнению с барьерной зоной.**
4. **Разработанная КИМ сценария радиоподавления НАП СРНС позволяет оценить эф­фективность различных конфигурации ПРС РЭБ, в том числе на базе изделий «Поле-21Э», «Оп- тима-3.2», выявить их недостатки (наличие разрывов в формируемом ПНПР) при решении задач радиоподавления помехозащищённой НАП с ААР на различных высотах и обосновать про­грамму натурных полигонных испытаний развёртываемых позиционных районов, что позволит сэкономить ресурсы на проведение летных испытаний.**
5. **Сформированы предложения по организации ПНПР с применением ПРС РЭБ на базе типовых ПАП в интересах радиоподавления помехозащищённой НАП СРНС, оснащенной ААР4 и ААР7.**

**Список сокращений и условных обозначений**

**ААР - Адаптивная антенная решетка**

**ААР4 - Четырехэлементная антенна решетка**

**ААР7 - Семиэлементная антенна решетка**

**АП - Активная (маскирующая) помеха**

**АР - Антенна решетка**

**АРУ - Автоматическая регулировка усиления**

**АЭ - Антенный элемент**

**БЛА - Беспилотный летательный аппарат**

**БПФ - Быстрое преобразование Фурье**

**ВБ - Воздушное базирование**

**ВП - Внутрисистемные помехи**

**ДН - Диаграмма направленности**

**ДХ - Дискриминационная характеристика**

**ИА - Изотропная антенна**

**ИМП - Имитирующие (интеллектуальные) помехи**

**ИНС - Инерциальная навигационная система**

**КУ ОСП - Коэффициент улучшения отношения сигнал/помеха адаптивной ан­**

**тенной решетки**

**ВА ОСП - Выигрыш за счет адаптации антенной решетки относительно не­**

**адаптивной антенной решетки в отношении сигнал/помеха КИМ - Компьютерная имитационная модель**

**ЛА - Летательный аппарат**

**МРП - Модуль радиопомех**

**НАП - Навигационная аппаратура потребителей**

**НАР - Неадаптивная антенна решетка**

**НБ - Наземное базирование**

**НС - Навигационный сигнал**

**НСЗ - Навигационный спутник Земли**

**ОСП - Отношение сигнал/помеха**

**ОСШ - Отношение сигнал/шум**

**ПАП - Постановщик активных помех**

**ПЗ - Помехозащита**

**ПНПР - Противонавигационное поле радиопомех**

**ППМ - Плотность потока мощности**

**ПРП - Пост радиопомех**

**ПРС - Пространственно-распределенная система**

**РП - Радиоподавление**

**РЭБ - Радиоэлектронная борьба**

**СПМ - Спектральная плотность мощности**

**СРНС - Спутниковые радионавигационные системы**

**СШ - Собственный шум (в канале приемника)**

**ФАПЧ - Фазовая автоподстройка частоты**

**ХО - Характеристика обнаружения**

**ЧАПЧ - Частотная автоподстройка частоты**

**ЧРФ - Частотно-режекторный фильтр**

**ШП - Шумовая помеха**

**Список литературы**

1. **ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Петрова, В. И. Хари­сова. - Изд.-е 4-е, перераб. и доп. - М.: Радиотехника, 2010. - 800 с.**
2. **Jay R. Sklar *Interference Mitigation Approaches for the Global Positioning System,* Lincoln labora­tory journal, vol. 14, no. 2, pp. 168-180, 2003.**
3. **Вейцель А.В., Вейцель В.А., Татарников Д.В. Аппаратура высокоточного позиционирования по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем: высокоточные антенны. Специ­альные методы повышения точности позиционирования / Под редакцией М.И. Жодзишского. - М.: МАИ-ПРИНТ, 2010. - 38 с.: ил. ISBN 97805-7035-2245-5.**
4. **Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки. Введение в теорию / Перевод с английского под ред. В.А. Лексаченко. — М.: Радио и связь, 1986. — 448 с.: ил.**
5. **Харисов В.Н., Ефименко В.С., Оганесян А.А., Пастухов А.В., Павлов В.С., Головин П.М., Мед­ведев П.В. Оценка характеристик подавления помех приемникам ГНСС с антенными решетками в реальных условиях / Радиотехника, № 7, 2013.**
6. **Тяпкин, В. Н. Т995 Методы определения навигационных параметров подвижных средств с ис­пользованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС: монография / В. Н. Тяп­кин, Е. Н. Гарин. - Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. - 260 с. ISBN 978-5-7638-2639-5.**