

На правах рукописи



Камнев Евгений Анатольевич

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

Специальность 05.12.14 - «Радиолокация и радионавигация»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования (ФГБОУ ВО) «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель:

Юдин Василий Николаевич, доктор технических наук, профессор Московского авиационного института

Официальные оппоненты:

Ефименко Валерий Сергеевич, доктор технических наук, профессор, ОАО «ВНИИР-Прогресс», начальник отдела НИОКР

Коробков Михаил Александрович, кандидат технических наук, ООО «КТЦ «Инлайн Групп», инженер по применению

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение «3 Центральный научно-исследовательский институт» Министерства обороны Российской Федерации

Защита диссертации состоится «31» октября 2018 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.03 при ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского авиационного института.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Д 212.125.03, доктор технических наук,
доцент



М.И. Сычев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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, которое реализуется средствами радиоэлектронной борьбы (РЭБ). 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 СРНС.

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. В настоящее время ситуация, характеризуемая низкой помехоустойчивостью НАП, 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 (НС) и помех, а также на программных методах защиты от дезинформирующих помех.

Проблеме разработки способов защиты от воздействия маскирующих и дезинформирующих помех посвящено множество работ авторов Монзинго Р.А., Миллера Т.У., Уидроу Б., Стирнза С., Перова А.И., Харисова В.И., Ван Триса Г.Л., Нильсона Д., Лашапеля Д., Хамфри Т.Е. и других авторов. Наиболее перспективным направлением развития средств защиты от маскирующих радиопомех является разработка адаптивных антенных решеток (ААР) с пространственно-временной обработкой сигналов, реализующих операции пространственной режекции радиопомех (формирование «провалов» в диаграмме направленности (ДН) ААР в направлении постановщиков активных помех (ПАП)) и пространственной селекции полезных НС (фокусировки ДН ААР на рабочие навигационные спутники Земли (НСЗ)). Внедрение в технику НАП перспективных средств помехозащиты резко снижает эффективность средств 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

(ПРС) РЭБ, формирующих ПНПР в интересах объектово-территориальной защиты, в условиях действия помехозащищенных образцов НАП, оснащенных ААР, за счет совершенствования состава, пространственного размещения и параметров ПАП.

В диссертационной работе в качестве **объекта исследования** рассматривается ПРС ПАП, создающих ПНПР в интересах объектово-территориальной защиты. **Предметом исследования** является помехоустойчивость НАП СРНС, оснащенной средствами адаптивной пространственно-временной обработки сигналов, в условиях действия ПРС ПАП.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи. Разработка описательной модели помехозащищенной НАП как объекта радиоподавления. 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. Разработка компьютерных имитационных моделей (КИМ) ААР, используемых в составе НАП. Проведение модельных экспериментов по оценке помехоустойчивости НАП, оснащенной ААР, в условиях действия ПРС ПАП. Разработка КИМ сценария радиоподавления НАП, оснащенной ААР. Проведение модельных экспериментов по оценке зон радиоподавления помехозащищенной НАП, оснащенной ААР. Анализ результатов экспериментов и формирование предложений по построению ПНПР.

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 защищенный патентом РФ способ создания ПНПР в интересах объектово-территориальной защиты, 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, а также в интересах разработки помехозащищенных образцов НАП. Методики расчета коэффициентов подавления и требуемой энергетике 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, 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 ААР4 и ААР7. Разработана КИМ 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 защиты.

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

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

Основные 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

четырёх 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.

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

Апробация результатов 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.), III-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.).

Публикации. 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».

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

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, формулируются цели и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

В первом разделе приведена описательная модель помехозащищённой НАП как объекта радиоподавления, включая аналитический обзор современных средств и способов помехозащиты перспективных НАП от маскирующих и дезинформирующих помех.

Во втором разделе сформулированы основные цели и задачи ПНПР, создаваемого для противодействия НАП, в интересах объектово-территориальной защиты. Предложен способ создания ПНПР с барьерной зоной. Сформулированы условия радиоподавления НАП и разработан методический аппарат, позволяющий на основе аналитических соотношений, определить коэффициенты подавления НАП с учетом основных факторов, влияющих на эффективность радиоподавления, которые определяются режимами ее работы с характерными показателями качества подавления, влиянием внутрисистемных факторов СРНС и средств помехозащиты. Получены соотношения для определения требуемой плотности потока мощности радиопомех в пределах ПНПР при одиночном и коллективном сценариях радиоподавления НАП.

Условие радиоподавления НАП активной маскирующей помехой (АП) имеет общий вид:

$$\frac{P_{п. вх}}{P_{НС вх}} = \frac{P_{с.ш. вх} + P_{АП вх}}{P_{НС вх}} \geq K_{под} (ПК_{под}), \quad (1)$$

где $P_{п. вх}$ – суммарная мощность аддитивной смеси собственного шума (СШ) и внешней АП на входе приемника НАП в полосе его пропускания; $P_{с.ш. вх}$ – мощность СШ приемника НАП, приведенная к его входу; $P_{АП вх}$ – мощность внешней АП на входе приемника НАП; $P_{НС вх}$ – мощность НС рабочего НСЗ на входе приемника НАП; $K_{под} (ПК_{под})$ – коэффициент подавления НАП; $ПК_{под}$ – показатель качества подавления.

Модифицированное соотношение для определения требуемого коэффициента подавления НАП для различных показателей качества подавления с учетом внутрисистемных факторов и структуры помеховых сигналов при воздействии АП определяется:

$$K_{под НАП} (ПК_{под}) = \frac{1}{K_{кач.АП}} \left[\frac{2 B_{НС}}{q_{вых.треб}^2 (ПК_{под}) K_{пот}} - K_{кач.ш} q_{ш/НС вх}^2 - \sum_{i=1}^{N_{ВП}} q_{ВПi/НС вх}^2 K_{кач.ВПi} \right], \quad (2)$$

где $q_{вых.треб}^2 (ПК_{под})$ – требуемое значения отношения сигнал/помеха (ОСП) на выходе коррелятора для заданного $ПК_{под}$; $K_{кач.АП}$ – коэффициент качества помехи, показывающий во сколько раз мощность помехи на входе приемника в полосе его пропускания должна отличаться от мощности помехи с равномерной спектральной плотностью мощности, чтобы обеспечить одинаковую с ними величину $q_{вых}^2 = q_{вых.треб}^2$, при приеме одного и того же НС; $B_{НС}$ – база накапливаемого фрагмента НС; $K_{пот}$ – коэффициент потерь отношения сигнал/шум, учитывающий потери из-за неидеальности корреляционной обработки; $K_{кач.ш}$ – коэффициент качества суммарного шума; $q_{ш/НС вх}^2 = \frac{P_{ш.ш}}{P_{НС вх}}$ – отношение суммарного шума к мощности НС на входе приемника НАП; $N_{ВП}$ – количество внутрисистемных помех (ВП), создаваемых СРНС; $q_{ВПi/НС вх}^2$ – отношение мощности i – й компоненты ВП к мощности НС на входе приемника НАП; $K_{кач.ВПi}$ – коэффициент качества i – й компоненты ВП.

Показатель качества подавления ($ПК_{под}$) это параметр, характеризующий функциональную связь величины $q_{вых.треб}^2$ с вероятностными и временными характеристиками, при которых приемник НАП не способен выполнять возложенные на него функции на этапе первичной обработки НС. На этапе обнаружения НСЗ АП затрудняет обнаружение НС. На этапе сопровождения

НСЗ действие АП приводит к возрастанию вероятности пропуска НС в процессе сопровождения, увеличению ошибок слежения за параметрами НС (несущей и временной), а также к срыву слежения за этими параметрами и срыву сопровождения НСЗ.

Качество радиоподавления НАП на этапе поиска, допоиска и слежения за параметрами НС целесообразно оценивать: величиной ОСП на выходе коррелятора НАП $q_{\text{ВЫХ}}^2$; вероятностью $P_{\text{необн. НСЗ } \tau}$ предотвращения обнаружения НСЗ в течение заданного времени τ ; временем $\tau_{\text{необн. НСЗ, } P^*}$ предотвращения обнаружения НСЗ с заданной вероятностью P^* ; вероятностью $P_{\text{срыва сопр. НСЗ } \tau}$ срыва сопровождения рабочего НСЗ за заданное время τ ; временем $\tau_{\text{срыва сопр. НСЗ, } P^*}$ от момента начала действия АП, за которое с заданной вероятностью P^* обеспечивается срыв сопровождения НСЗ; вероятностью $P_{\text{срыва слеж. } \tau}$ срыва слежения за несущей и задержкой кода НС в течение заданного времени τ ; временем $\tau_{\text{срыва слеж. } P^*}$ для срыва слежения за несущей и задержкой кода НС с заданной вероятностью P^* . Все указанные показатели однозначно связаны с величиной $q_{\text{ВЫХ}}^2$.

Условие подавления НАП совокупностью ПАП $_i$, $i = 1, 2 \dots N_{\text{ПАП}}$ из состава ПНПР с учетом действия средств помехозащиты (ПЗ), имеющих в составе НАП, имеет вид:

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{ПАП}}} \left(\frac{\text{ППМ}_{\text{АП}_i}^{\text{НАП}}}{\text{ППМ}_{\text{НС}}^{\text{НАП}} K_{\text{ул } i}^{(\text{ПЗ})}} \right) \geq K_{\text{под НАП}} (\text{ПК}_{\text{под}}), \quad (3)$$

где $\text{ППМ}_{\text{НС}}^{\text{НАП}}$ - плотность потока мощности НС рабочего НСЗ в точке расположения НАП; $\text{ППМ}_{\text{АП}_i}^{\text{НАП}}$ - плотность потока мощности АП $_i$, создаваемой в точке расположения НАП ПАП $_i$; $K_{\text{ул } i}^{(\text{ПЗ})}$ - коэффициент улучшения отношения (НС/(помеха от ПАП $_i$)) по мощности на входе приемника НАП, средствами ПЗ, имеющимися в составе НАП.

Коэффициент улучшения $K_{\text{ул } i}^{(\text{ПЗ})}$ определяется произведением:

$$K_{\text{ул } i}^{(\text{ПЗ})} = K_{\text{ул } i}^{(\text{простр.реж})} K_{\text{ул } i}^{(\text{простр.сел})} K_{\text{ул } i}^{(\text{поляриз.сел})} K_{\text{ул } i}^{(\text{поляриз.реж})} K_{\text{ул } i}^{(\text{частотн.реж})}, \quad (4)$$

где множители представляют собой соответственно коэффициенты улучшения отношения (НС/(помеха от ПАП $_i$)) по мощности на входе приемника НАП средствами ПЗ: пространственной режекции ($K_{\text{ул}}^{(\text{простр.реж})}$), пространственной селекции ($K_{\text{ул}}^{(\text{простр.сел})}$), поляризационной селекции ($K_{\text{ул}}^{(\text{поляриз.сел})}$), поляризационной режекции ($K_{\text{ул}}^{(\text{поляриз.реж})}$), частотной режекции ($K_{\text{ул}}^{(\text{частотн.реж})}$), имеющимися в составе подавляемой НАП.

Соотношение (3) учитывает действие основных факторов, определяющих эффективность радиоподавления НАП: наличие в составе подавляемой НАП средств ПЗ, в том числе на базе ААР; возможность коллективного подавления НАП с помощью ПРС ПАП; функционирования подавляемой НАП в режимах поиска, допоиска и слежения.

Результаты расчетов по разработанной методике показывают, что радиоподавление образцов НАП, имеющих в своем составе средства помехозащиты с $K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})}$ на уровне 30 дБ и выше,

требует высоких энергозатрат даже при относительно небольших расстояниях между ПАП и подавляемой НАП. При столь высоких потребных энергозатратах решение задачи радиоподавления помехозащищенных образцов НАП становится проблематичным.

При решении задач объектово-территориальной защиты для создания ПНПР может потребоваться достаточно большое количество ПАП, что несет в себе существенные затраты ресурсов как энергетических, так и технических. Минимизации затрат ресурсов на создание ПНПР можно добиться следующими путями: поиск оптимальной конфигурации ПНПР с учетом особенностей функционирования средств ПЗ НАП и учет особенностей функционирования режимов работы НАП. Снижение требований к энергетике ПАП при построении ПНПР может быть достигнуто с учетом того обстоятельства, что радиоподавление НАП, работающей в различных режимах, требует различной мощности АП. Например, в режиме слежения за параметрами НС НАП обладает существенно более высокой помехоустойчивостью (7...15 дБ), чем в режиме поиска и допоиска НС. Следовательно, обеспечив срыв слежения за параметрами НС в пределах некоторой «барьерной зоны», расположенной вдоль границы ПНПР, можно значительно снизить требования к мощности ПАП, расположенных в глубине зоны ПНПР (вокруг объекта защиты). Предложенный способ позволяет разделить ПНПР на две зоны: «барьерной зоны» на границе ПНПР, где обеспечивается срыв слежения за параметрами НС, и зону (оставшуюся часть защищаемой территории), где обеспечивается предотвращение допоиска (поиска) НС после срыва слежения.

В третьем разделе приводится краткое описание разработанной КИМ ААР, применяемых в современных помехозащищенных образцах НАП, изложены результаты компьютерного имитационного моделирования по оценке помехоустойчивости ААР в условиях воздействия ПРС ПАП наземного (НБ) и воздушного базирования (ВБ), сформулированы подходы по организации радиоподавления НАП, оснащенной ААР4 и ААР7.

Рассмотрены два типа конфигураций ААР, наиболее часто используемых в приложениях СРНС - плоская ААР4 и плоская ААР7. Анализ проводился на несущей частоте 1575,42 МГц. Межэлементное расстояние равно половине рабочей длины волны. В модели принято допущение о том, что антенные элементы (АЭ) расположены в свободном пространстве. В качестве помехового сигнала, излучаемого ПАП, рассматривается шумовая помеха с равномерной спектральной плотностью мощности в полосе 30 МГц.

Выходной сигнал ААР определяется как

$$\mathbf{Y} = \mathbf{W}^H \mathbf{X}, \quad (5)$$

где $\mathbf{W} = [w_0 \dots w_{N-1}]^T \in V^{N \times 1}$ - вектор весовых коэффициентов, определяемых в соответствии с заданным критерием эффективности; \mathbf{X} – пространственно-временная матрица входного процесса – аддитивной смеси НС, АП и СШ; $(\cdot)^H$ – оператор комплексного транспонирования.

В КИМ в качестве критерия адаптации использован критерий минимума мощности выходного шума при линейном ограничении ДН в направлении сопровождаемого НСЗ:

$$\arg \min_{\mathbf{W}} E\{|\mathbf{W}^H \mathbf{X}|^2\} \text{ при } \mathbf{W}^H \mathbf{h}_m = 1, \quad (6)$$

где \mathbf{h}_m – вектор фокусировки в направлении m -го сопровождаемого НСЗ.

Вектор оптимальных весовых коэффициентов в соответствии с выбранным критерием адаптации определяется следующим выражением

$$\mathbf{W}_{\text{опт}} = \frac{\hat{\mathbf{R}}_{\text{XX}}^{-1} \mathbf{h}_m^H}{\mathbf{h}_m^H \hat{\mathbf{R}}_{\text{XX}}^{-1} \mathbf{h}_m^H}, \quad (7)$$

где $\hat{\mathbf{R}}_{\text{XX}}$ – оценка выборочной корреляционной матрицы суммы НС, АП и СШ в каналах антенной решетки (АР).

В настоящей работе используется метод непосредственного обращения выборочной корреляционной матрицы для оценки обратной матрицы $\hat{\mathbf{R}}_{\text{XX}}^{-1}$. Оценка $\hat{\mathbf{R}}_{\text{XX}}$ при объеме выборки входного процесса K определяется соотношением:

$$\hat{\mathbf{R}}_{\text{XX}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{X}[k] \mathbf{X}[k]^H. \quad (8)$$

В качестве меры помехозащитной эффективности ААР приняты:

- коэффициент улучшения (КУ) отношения сигнал/помеха (ОСП) на выходе ААР (после адаптации) по отношению к выходу изотропной антенны (ИА), определяемый как произведение:

$$K_{\text{ул}}^{(\text{ААР})} = K_{\text{пер НС}}^{(\text{АР})} \cdot K_{\text{осл АП}}^{(\text{АР})} \cdot \frac{G_{\text{АЭ}}^{\text{НСЗ}}}{G_{\text{АЭ}}^{\text{ПАП}}} = \frac{K_{\text{пер НС}}^{(\text{АР})} G_{\text{АЭ}}^{\text{НСЗ}}}{K_{\text{пер АП}}^{(\text{АР})} G_{\text{АЭ}}^{\text{ПАП}}}, \quad (9)$$

где $K_{\text{пер НС}}^{(\text{АР})}$ – коэффициент передачи АР по рабочему НС; $K_{\text{пер АП}}^{(\text{АР})}$ – коэффициент передачи АР по АП; $K_{\text{осл АП}}^{(\text{АР})}$ – коэффициент ослабления АП; $G_{\text{АЭ}}^{\text{НСЗ}}$ – коэффициент усиления одиночного АЭ в направлении НСЗ; $G_{\text{АЭ}}^{\text{ПАП}}$ – коэффициент усиления одиночного АЭ в направлении ПАП.

- коэффициент выигрыша за счет адаптации в отношении КУ ОСП ААР относительно КУ ОСП неадаптивной АР (НАР) (далее ВА ОСП), определяемый отношением:

$$K_{\text{ВА}}^{(\text{ААР})} = \frac{K_{\text{ул}}^{(\text{ААР})}}{K_{\text{ул}}^{(\text{НАР})}}, \quad (10)$$

где $K_{\text{ул}}^{(\text{НАР})}$ – КУ ОСП, обеспечиваемый рассматриваемой АР в ее неадаптивном варианте (до начала процесса адаптации).

Разработанная КИМ ААР позволяет обеспечить: выбор конфигурации ААР (ААР4 и ААР7); выбор формы ДН АЭ АР (в экспериментах выбран АЭ АР, обладающий спадом КУ относительно зенита в направлении горизонта 10 дБ); выбор межэлементного расстояния; задание объема выборки K ; задание координат (азимут, угол места) и мощности каждого ПАП; задание координат источника полезного НС (азимут, угол места); задание рассогласования амплитудно-частотных характеристик и задержек в каналах АР (в экспериментах выбраны не более 0.2 дБ и 1 нс соответственно); оценку КУ ОСП и ВА ОСП при воздействии группы ПАП.

Для оценки помехоустойчивости ААР4 и ААР7 на разработанной КИМ проведена серия модельных экспериментов для нескольких сценариев радиоподавления с помощью ПРС ПАП наземного и воздушного базирования.

Основные результаты анализа помехоустойчивости ААР4 методом модельного эксперимента

На рисунке 1 показаны результаты расчетов зависимостей КУ ОСП (а) и ВА ОСП (б) ААР4 от мощности АП на выходе ИА и количества ПАП ($N_{\text{ПАП}}$ от 1 до 5), распределенных равномерно по азимуту на линии горизонта.

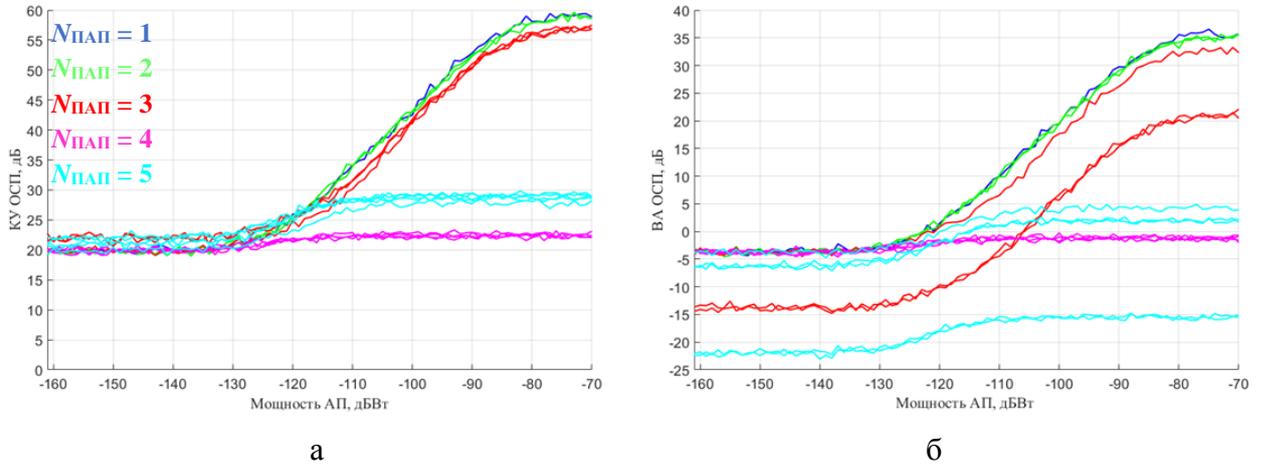


Рисунок 1

При воздействии $N_{\text{ПАП}} \leq 3$ увеличение мощности АП больше СШ приводит к увеличению ВА ОСП, который может достигать 20...35 дБ в направлении ПАП НБ, что является неэффективной мерой при организации радиоподавления НАП.

На рисунке 2 представлены диаграммы КУ ОСП для ПАП₃ при воздействии на ААР4 четырех (а) и пяти (б) ПАП НБ соответственно в зависимости от взаимного азимутального рассогласования $\Delta\beta_{\text{ПАП-ПАП}}$ и углового расположения группы ПАП $\beta_{\text{ПАП1}}$ относительно провала в ДН НАР4. Отношение АП/СШ по мощности в каналах АР, создаваемое каждым ПАП, при оценке КУ ОСП и ВА ОСП в зависимости от угловых положений ПАП принято равным 40 дБ.

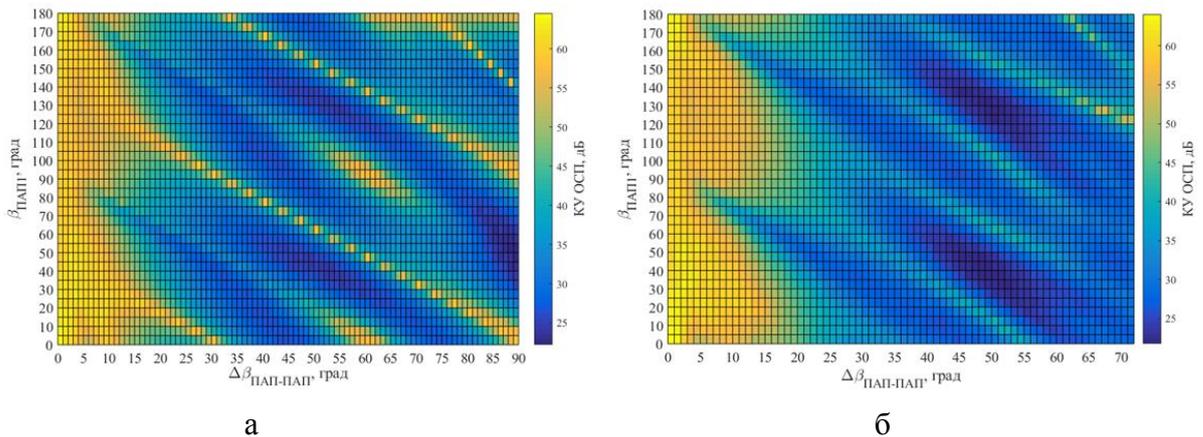


Рисунок 2

Расстановка не менее четырех ПАП НБ в виде компактной группы с малыми азимутальными разносами между соседними ПАП НБ, с точки зрения организации радиоподавления НАП с ААР4, невыгодна, поскольку ААР4 может формировать ДН с провалом вида «овраг», перекрывающим всю азимутальную зону расположения группы ПАП НБ. При воздействии пяти ПАП НБ с $\Delta\beta_{\text{ПАП-ПАП}}$ не менее 26° , шести ПАП НБ с $\Delta\beta_{\text{ПАП-ПАП}}$ не менее 21° , семи ПАП НБ с $\Delta\beta_{\text{ПАП-ПАП}}$

не менее 17° - средний ВА ОСП по всем ПАП НБ находится в интервале от минус 4 до плюс 10 дБ, а среднее значение КУ ОСП по всем ПАП НБ лежит в интервале от 26 до 38 дБ при любом расположении группы ПАП НБ. Равномерная расстановка по азимуту четырех и более ПАП НБ, при которой уже при $N_{\text{ПАП}} = 4$ возможна нейтрализация ВА ОСП ААР4 по отношению к НАР4, наиболее эффективна.

На рисунке 3 показаны ДН ААР4 (после завершения адаптации) в направлении трех (а) и четырех (б) ПАП ВБ, равномерно распределённых по азимуту с углами места от 40° до 70° .

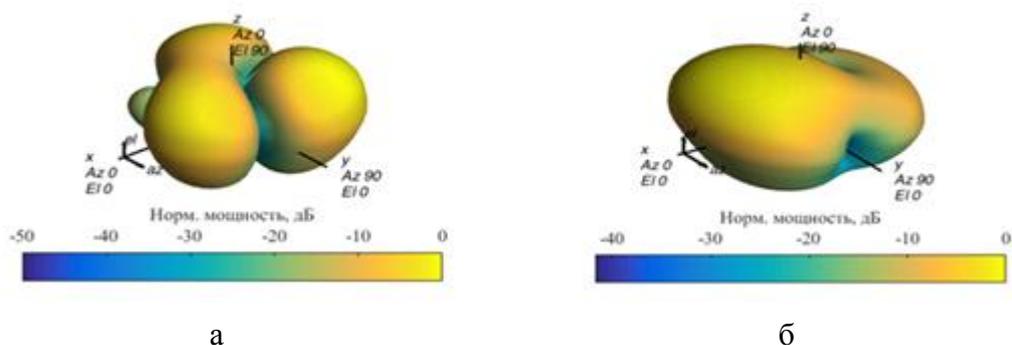


Рисунок 3

При воздействии до трех ПАП ВБ ААР4 эффективно формирует «точечные» провалы в ДН в направлении всех ПАП, при этом КУ ОСП достигает 39...41 дБ, а ВА ОСП достигает 33...38 дБ. При воздействии четырех ПАП ВБ ВА ОСП лежит в интервале от минус 4 до плюс 7.6 дБ, а КУ ОСП в интервале от 2 до 9 дБ. При нейтрализации ВА ОСП величина КУ ОСП определяется, в основном, формой ДН НАР4. Таким образом, ПАП ВБ, которые воздействуют на ААР4 со стороны верхней полусферы (выше плоскости горизонта), будут существенно эффективнее, чем группа ПАП, расположенных на линии горизонта и ниже.

Основные результаты анализа помехоустойчивости ААР7 методом модельного эксперимента

На рисунке 4 показаны результаты расчетов зависимостей КУ ОСП (а) и ВА ОСП (б) от мощности АП на выходе ИА и количества ПАП НБ ($N_{\text{ПАП}}$ от 4 до 10), распределенных равномерно по азимуту на линии горизонта.

При воздействии не более пяти ПАП НБ ААР7 формирует «точечные» провалы в ДН в направлении каждого ПАП. При воздействии шести и более ПАП НБ адаптивный алгоритм ААР7 формирует «кольцевой» провал в ДН, обеспечивающий режекцию всех ПАП НБ, находящихся в плоскости горизонта. При воздействии не менее девяти ПАП НБ, равномерно распределенных по азимуту, среднее значение КУ ОСП для мощных АП (минус 100...80 дБВт) достигает 40...45 дБ, при этом средний ВА ОСП составляет не менее 15 дБ. Это обстоятельство делает неэффективным наращивание количества ПАП НБ как средства обеспечения эффективного радиоподавления НАП, оснащенной ААР7. Сформированный «кольцевой» провал в ДН ААР7, как отклик на воздействие не менее шести ПАП НБ, значительно ухудшает условия сопровождения и обнаружения «низколетящих» НСЗ с углами места менее 50° .

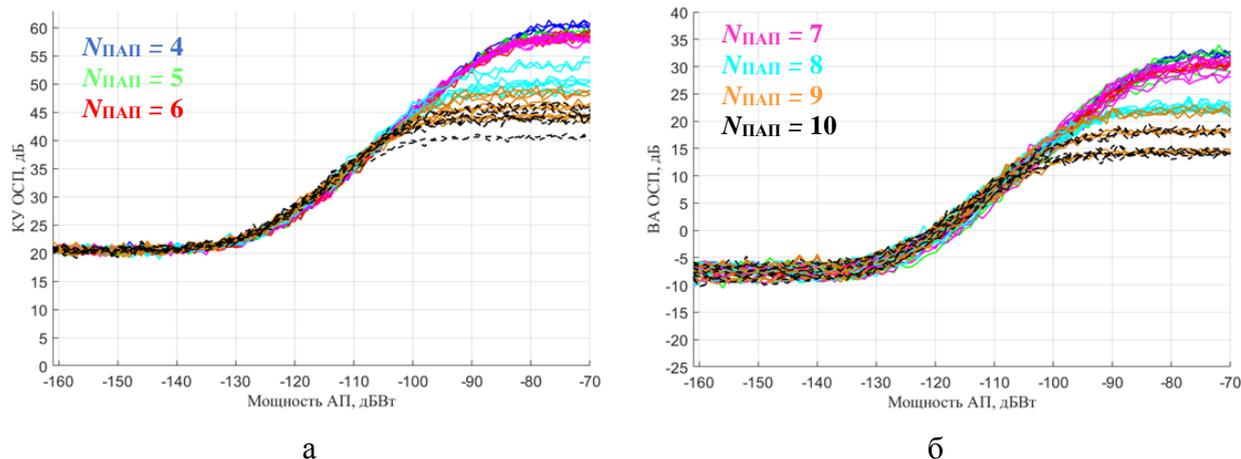


Рисунок 4

При воздействии на ААР7 девяти ПАП НБ и при сопровождении НСЗ, находящегося на возвышении 10° , 20° и 30° по углу места, КУ ОСП составляет не более 9, 15 и 24 дБ соответственно, в то время как для НСЗ, находящегося в зените, КУ ОСП составляет не менее 40 дБ.

На рисунке 5 представлены семейства графиков КУ ОСП (а) и ВА ОСП (б) для ААР7 при воздействии шести ПАП НБ, равномерно распределенных по азимуту, и одного ПАП ВБ в зависимости от угла места ПАП ВБ ($\epsilon_{\text{ПАП}7}$).

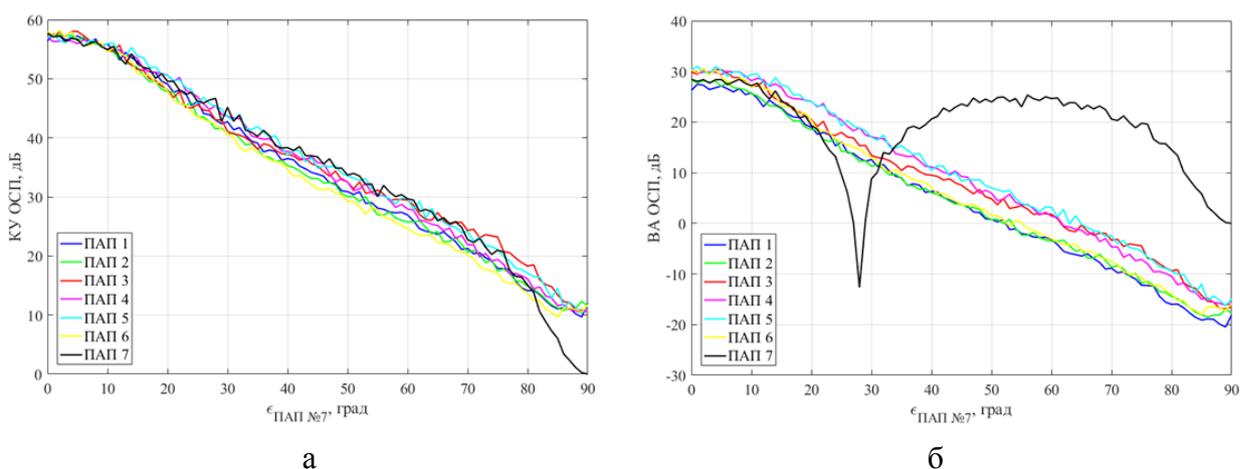


Рисунок 5

Комбинированное воздействие шести ПАП НБ и одного ПАП ВБ с достаточным углом места позволяет нейтрализовать ВА ОСП ААР7. Увеличение угла места ПАП ВБ приводит к снижению КУ ОСП и ВА ОСП в направлении ПАП НБ, а при углах места более 40° ВА ОСП для ПАП НБ снижается до 10 дБ и менее, а при углах места более 50° ВА ОСП в направлении некоторых ПАП НБ отсутствует. При воздействии не менее шести ПАП ВБ эффективность ААР7 снижается с увеличением разноса по углу места между ПАП ВБ, а при угловом разносе более 7° ВА ОСП в направлении некоторых ПАП ВБ отсутствует.

Предложения по построению ПНПР для противодействия НАП, оснащенной ААР4 и ААР7, на базе ПРС ПАП НБ и ВБ.

1. *Предложения по построению ПНПР на базе ПАП НБ.* Как правило, ПАП НБ воздействуют на НАП с направления горизонта или ниже его. Если подавляемая НАП оснащена ААР4,

то для снижения ее эффективности необходимо в каждой точке ПНПР обеспечить воздействие на подавляемую НАП не менее четырех ПАП НБ с равномерной расстановкой по азимуту в пределах 360° , при этом средний ВА ОСП ААР4 в направлении ПАП НБ незначителен или отсутствует, а при воздействии пяти, шести и семи ПАП НБ с взаимным азимутальным рассогласованием не менее, соответственно, 26° , 21° и 17° средний ВА ОСП ААР4 будет гарантированно находиться от минус 4 до плюс 10 дБ. Требования к энергетике каждого ПАП НБ необходимо предъявлять с учетом значений КУ ОСП ААР4, который может достигать 20...30 дБ и более в направлении ПАП НБ. Высокий уровень помехозащищенности НАП, оснащенной ААР7, обусловлен создаваемым «кольцевым» провалом в ДН (в направлении всех ПАП НБ, действующих с любого азимута в окрестностях линии горизонта). Снижение ВА ОСП (глубины «кольцевого» провала в ДН) ААР7 путем воздействия на нее ПАП НБ возможно при наличии не менее девяти ПАП НБ с равномерным азимутальным разносом в пределах 360° , при этом минимальный КУ ОСП ААР7 для НС, находящегося в зените, составляет не менее 40 дБ, а ВА ОСП ААР7 не менее 15 дБ.

2. Предложения по построению ПНПР на базе ПАП ВБ. Применение ПАП ВБ, находящихся выше линии горизонта относительно платформы НАП с достаточным взаимным разносом по углу места и азимуту, является более эффективным приемом радиоподавления НАП по нескольким причинам. Во-первых, ПАП ВБ действуют по главному лепестку ДН ААР (ААР4 и ААР7), что существенно снижает требования к энергетике отдельного ПАП. Во-вторых, существует конечная вероятность «затенения» сопровождаемых НСЗ при малых угловых рассогласованиях с ПАП ВБ. В-третьих, эффективное радиоподавление ААР7 может быть достигнуто уже при шести ПАП ВБ, если имеет место достаточный угловой разнос между ними (по азимуту (равномерно) и углу места (не менее 7°)). Однако, при небольших углах возвышения ПАП ВБ над горизонтом ААР7 может сформировать «кольцевой» провал в ДН и существенно ослабить действующие на нее АП. Существенным недостатком построения ПНПР на базе ПАП ВБ является сложность технической реализации, поскольку требуется поддержание определенной конфигурации ПАП ВБ относительно подавляемой НАП.

3. Предложения по построению ПНПР на базе ПАП НБ и ВБ. Комбинированный сценарий радиоподавления с использованием ПАП НБ и ВБ является компромиссным вариантом построения ПНПР для противодействия НАП с ААР4 и ААР7. Во-первых, реализация относительно мощных пространственно-распределенных ПАП НБ необходима для использования всех степеней свободы ААР7 (либо ААР4), а количество ПАП НБ, одновременно воздействующих на ААР, должно быть не менее трех для ААР4 и шести для ААР7. Такое воздействие может быть организовано, например, при расстановке ПАП вида «квадрат» (кластеры ПАП НБ из четырёх, девяти и т.д.). Во-вторых, применение не менее одного относительно маломощного ПАП ВБ, действующего по главному лепестку ДН ААР7 с достаточным возвышением над горизонтом, способно нейтрализовать ВА ОСП в направлении некоторых ПАП НБ, что не достигается при воздействии только ПАП НБ. С учетом этого, ВА ОСП ААР7 для мощных ПАП НБ снижется с увеличением

угла места ПАП ВБ, а при воздействии на ААР7 шести ПАП НБ и одного ПАП ВБ с углом места более 50° ВА ОСП для некоторых ПАП НБ отсутствует. ПАП ВБ может располагаться в центре конфигурации ПАП НБ (например, расстановки вида «квадрат»). Применение относительно небольшого числа ПАП ВБ позволяет снизить сложность реализации ПНПР, а также уменьшить требуемые энергозатраты.

В четвертом разделе приводится краткое описание разработанной КИМ сценария радиоподавления НАП, оснащенной ААР4 и ААР7, с помощью ПРС ПАП, изложены результаты по оценке зон радиоподавления НАП с ААР4 и ААР7 для нескольких конфигураций ПРС ПАП наземного базирования, сформулированы предложения по размещению ПАП НБ в пределах барьерной зоны и в глубине защищаемой территории на базе предложенного способа радиоподавления НАП в интересах объектово-территориальной защиты. КИМ сценария радиоподавления НАП предназначена для оценки зон радиоподавления (РП) помехозащищенной НАП с помощью ПРС ПАП с произвольной конфигурацией. Разработанная КИМ позволяет построить зоны РП НАП для произвольной высоты с учетом следующих параметров: наличия средств ПЗ (ААР4 или ААР7), произвольного расположения ПАП на местности и их пространственной ориентации по углу места и азимуту, ДН и энергопотенциала ПАП, а также показателей качества подавления в режиме поиска, допоиска и слежения, коэффициентов качества помехи и условия необнаружения (срыва слежения) заданного количества НСЗ. Разработанная КИМ может быть использована в интересах оценки эффективности ПРС РЭБ на базе изделий «Поле-21Э», «Оптим-3.2» и др.

На рисунке 7 показаны результаты расчетов зон РП НАП с ААР4 на высоте 200 м, работающей по сигналам СРНС GPS на частоте 1575,42 МГц, для девяти ПАП с расстановкой вида «квадрат». Тип помехового сигнала – заградительная шумовая помеха (ЗШП) с равномерной спектральной плотностью мощности в полосе 30 МГц.

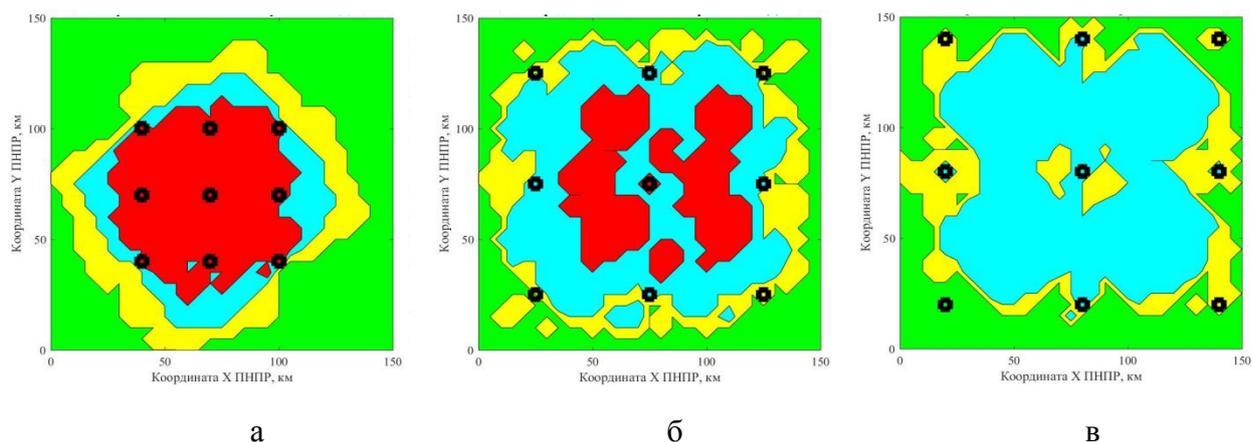


Рисунок 6

В модели используются ПАП, состоящие из трех модулей радиопомех со следующими характеристиками: энергопотенциал 1000 Вт, ДН в горизонтальной плоскости не менее 120° , а вертикальной не менее 20° . Результаты моделирования показывают, что для радиоподавления НАП с ААР4 в режиме слежения за несущей НС (красная область) на высоте 200 м и 1000 м в пределах

всего кластера из девяти ПРП достаточно иметь расстояние между ПРП не более 30 км, для реализации предотвращения поиска/допоиска (желтая/голубая области) НС после срыва слежения расстояние между ПРП можно увеличить до двух раз (50...60 км).

На рисунке 8 показана конфигурация ПНПР с барьерной зоной (а) и результаты расчета зон РП НАП с ААР4 (б), работающей по сигналам СРНС GPS на частоте 1575.42 МГц, помехой ЗШП. Барьерная зона создается ПАП (№1-№10), которые обеспечивают срыв слежения за несущей НС (красная область). В промежуточной зоне между ПАП №6-10 гарантированно реализуется срыв допоиска/поиска НС, что позволяет использовать в дальнейшем расстановку ПАП с шагом 50...60 км.

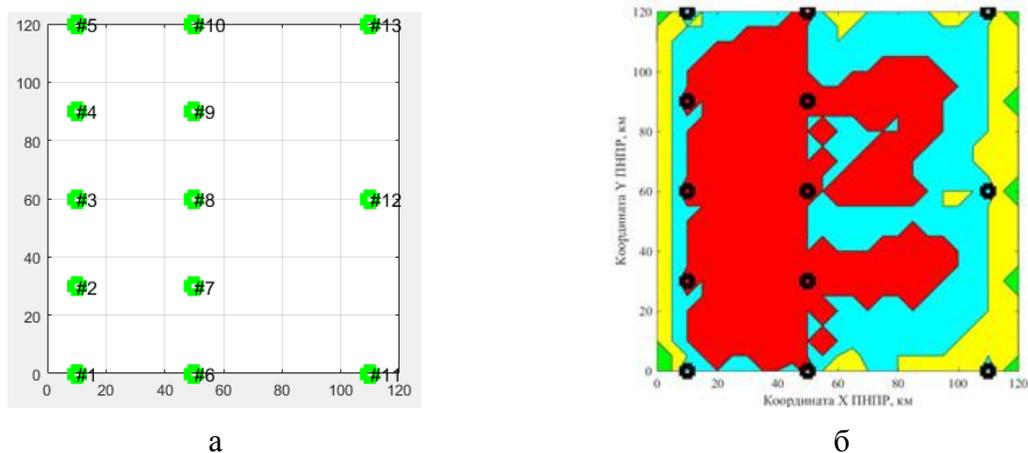


Рисунок 7

На рисунке 9 показана конфигурация ПНПР с барьерной зоной (а) и результаты расчета зон РП НАП с ААР7 (б), работающей по сигналам СРНС GPS на частоте 1575,42 МГц, помехой ЗШП.

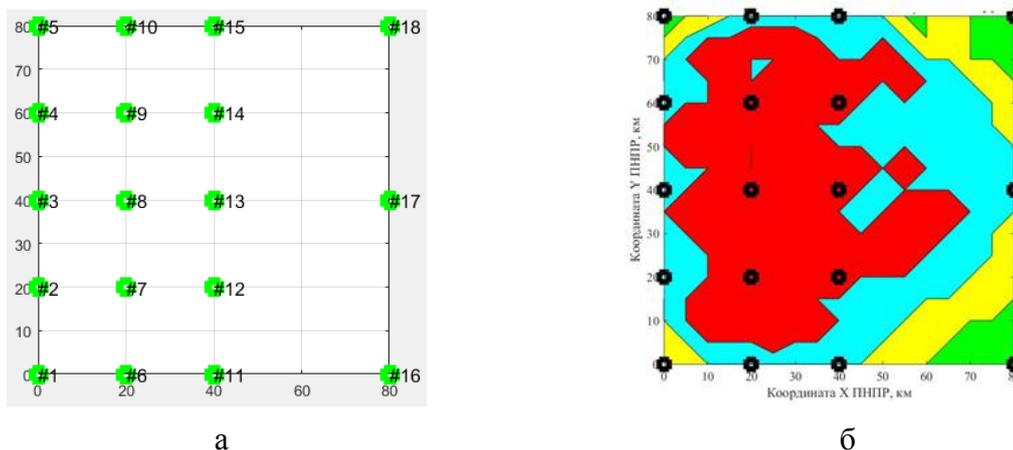


Рисунок 8

Для радиоподавления НАП с ААР7 на высоте 200 м и 1000 м в режиме слежения за несущей НС (красная область) в пределах всего кластера из 16 ПАП с расстановкой вида квадрат необходимо иметь расстояние между ПАП не более 20 км. Для реализации предотвращения поиска/допоиска НС после срыва слежения расстояние между ПАП можно увеличить до двух раз (30...40 км). Для высоты 1000 м расстояние между ПАП можно увеличить до 50 км.

Требования, предъявляемые к плотности расстановки ПАП в пределах ПНПР для радиоподавления НАП с ААР7, значительно более жесткие, чем для радиоподавления НАП с ААР4. Конфигурация ПНПР вида «квадрат» позволяет эффективно противодействовать помехозащищенной НАП СРНС, оснащенной ААР4 или ААР7. При организации объектово-территориальной защиты на базе ПАП НБ предлагается использовать конфигурацию ПНПР вида «квадрат» с барьерной зоной, которая позволит увеличить взаимное расстояние между ПАП за пределами барьерной зоны в глубине защищаемой территории за счет учета особенностей функционирования НАП в различных режимах.

В заключении излагаются основные результаты проведенных исследований:

1. Предложена методика определения энергетических характеристик ПНПР в интересах решения задач объектово-территориальной защиты и расчета коэффициентов подавления НАП, отличающаяся учетом действия средств помехозащиты, режимов работы НАП, внутрисистемных факторов СРНС и структуры помеховых сигналов.

2. Разработаны КИМ ААР, ориентированные на оценку помехоустойчивости помехозащищенной НАП в условиях действия ПРС ПАП. Получены количественные оценки помехоустойчивости ААР4 и ААР7, 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 конфигураций ПРС ПАП, в том числе на базе изделий «Поле-21Э», «Оптима-3.2», выявить их недостатки (наличие разрывов в формируемом ПНПР) при решении задач радиоподавления помехозащищенной НАП с ААР и обосновать программу 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 НАП СРНС, оснащенной ААР4 и ААР7.

Основные результаты диссертации опубликованы

в изданиях из перечня ВАК:

1. Юдин В.Н., Камнев Е.А. Способы защиты аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем от преднамеренных помех / Научные технологии, номер 8, т. 16, 2015, с.13-25.

2. Юдин В.Н., Камнев Е.А. Принципы создания противонавигационного поля радиопомех / Труды МАИ, выпуск №83, 2015.

3. Юдин В.Н., Камнев Е.А. Коэффициенты подавления средств обнаружения и сопровождения навигационных сигналов аппаратуры потребителя спутниковой радионавигационной системы / Электросвязь, выпуск №7, 2016, с. 29-34.

4. Камнев Е.А., Юдин В.Н. Коэффициенты подавления средств обнаружения и слежения за параметрами навигационных сигналов НАП СРНС / Электросвязь, выпуск №11, 2016, с. 56-59.

5. Юдин В.Н., Камнев Е.А. Условие радиоподавления НАП спутниковых РНС с учетом внутрисистемных факторов / Электросвязь, выпуск №10, 2017, с. 46-50.

6. Юдин В.Н., Камнев Е.А. Условие радиоподавления НАП спутниковых РНС с учетом наличия средств помехозащиты / Электросвязь, выпуск №10, 2017, с. 51-58.

7. Юдин В.Н., Камнев Е.А. Помехоустойчивость навигационной аппаратуры потребителя спутниковых радионавигационных систем с четырехэлементной антенной решеткой / Электросвязь, выпуск №6, 2018, с. 24-31.

прочие публикации (доклады):

8. Камнев Е.А. Юдин В.Н. Способы защиты аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем от преднамеренных радиопомех / Сборник тезисов докладов московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике - 2015». 21-23 апреля 2015 г., М.: МАИ, с.133-134, 2015.

9. Камнев Е.А., Юдин В.Н. Критерий срыва слежения за фазой, частотой и задержкой навигационного сигнала на основе методики линеаризации следящих систем / Сборник тезисов докладов XLII международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения - 2016». 12- 15 апреля 2016 г., Т. 1, М.: МАИ, 2016, с. 558-559.

10. Камнев Е.А. Исследование возможностей противодействия НАП СРНС, оснащенной средствами адаптивной пространственной режекции помех и селекции навигационных сигналов / Сборник тезисов 16-ой международной конференции «Авиация и космонавтика - 2017». 20 - 24 ноября 2017 г., М.: МАИ, 2017, с. 222-223.

11. Юдин В.Н., Камнев Е.А. Результаты модельного эксперимента по радиоподавлению навигационной аппаратуры потребителей с четырехэлементной адаптивной антенной решеткой / Вестник РАЕН, №3, т. 18, 2018, с. 87-94.

патенты и заявки:

12. Пат. 2581602 Российская Федерация, МПК G01S19/18. Способ радиоэлектронного подавления аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем в пределах защищаемой территории [текст] / Камнев Е.А., Юдин В.Н.; заявитель и патентообладатель МАИ. – N 2014153306/07; заявл. 29.12.2014; опубл. 20.04.2016, Бюл. N 11 – 3 с.: ил.

Тираж 100 экз.

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»

125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4
Тел. +7 499 158-43-33, 158-58-70, 158-00-02