

МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)



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»

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
1.1	Принципы функционирования спутниковых радионавигационных систем .....	10
1.2	Организация доступа в систему .....	10
1.3	Характеристики сигналов спутниковой радионавигационной системы gps .....	11
1.4	Построение и функционирование навигационной аппаратуры потребителей .....	14
1.4.1	Структура навигационной аппаратуры потребителей .....	14
1.4.2	Алгоритмы обработки навигационного сигнала .....	17
1.5	Помехозащита навигационной аппаратуры потребителей .....	22
1.5.1	Основные виды преднамеренных помех .....	22
1.5.2	Способы защиты от маскирующих помех .....	25
1.5.3	Способы защиты от имитирующих (интеллектуальных) помех .....	27
1.6	Выводы по разделу 1 .....	32
2	Определение характеристик противонавигационного поля радиопомех .....	34
2.1	Требования к характеристикам противонавигационного поля радиопомех .....	34
2.2	Условие подавления и показатели качества подавления навигационной аппаратуры потребителей в различных режимах .....	39
2.2.1	Показатели качества подавления в различных режимах функционирования навигационной аппаратуры потребителей .....	41
2.3	Условие радиоподавления навигационной аппаратуры потребителей с учетом внутрисистемных факторов и средств помехозащиты .....	65
2.3.1	Учет действия собственного шума и внутрисистемных помех .....	66
2.3.2	Учет действия средств помехозащиты .....	72
2.4	Расчетные характеристики противонавигационного поля радиопомех, создаваемого для противодействия навигационной аппаратуре потребителей спутниковых радионавигационных систем .....	84
2.4.1	Условие радиоподавления навигационной аппаратуры потребителя в пределах противонавигационного поля радиопомех .....	84
2.4.2	Требуемая плотность потока мощности поля радиопомех в пределах противонавигационного поля радиопомех .....	85
2.4.3	Требуемая мощность постановщиков активных помех, действующих в составе противонавигационного поля радиопомех .....	88
2.4.4	Требуемая мощность одиночного постановщика активных помех и дальность подавления	

навигационной аппаратуры потребителей .....	92
2.5 Выводы по разделу 2.....	94
3 Помехоустойчивость адаптивных антенных решеток в условиях действия пространственно-распределенной системы постановщиков активных помех.....	98
3.1 Модель адаптивной антенной решетки.....	98
3.2 Краткое описание компьютерной имитационной модели адаптивной антенной решетки ..	101
3.3 Модельный эксперимент по оценке эффективности адаптивной антенной решетки как средства помехозащиты навигационной аппаратуры потребителей .....	102
3.3.1 Общие параметры модельного эксперимента .....	103
3.3.2 Анализ помехоустойчивости четырехэлементной адаптивной антенной решетки методом модельного эксперимента .....	105
3.3.3 Анализ помехоустойчивости семиэлементной адаптивной антенной решетки методом модельного эксперимента .....	117
3.4 Предложения по рациональному построению противонавигационного поля радиопомех при противодействии навигационной аппаратуры потребителей, оснащенной адаптивными антенными решетками .....	135
3.4.1 Построение противонавигационного поля радиопомех на базе постановщиков активных помех наземного базирования.....	136
3.4.2 Построение противонавигационного поля радиопомех на базе постановщиков активных помех воздушного базирования.....	137
3.4.3 Построение противонавигационного поля радиопомех на базе постановщиков активных помех наземного и воздушного базирования .....	138
3.5 Выводы по разделу 3.....	138
4 Оценка зон радиоподавления навигационной аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем, оснащенных адаптивными антенными решетками .....	140
4.1 Имитационная модель сценария радиоподавления навигационной аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем .....	140
4.2 Эксперимент по определению зон радиоподавления навигационной аппаратуры потребителей.....	142
4.2.1 Общие параметры модельного эксперимента .....	142
4.2.2 Оценка зон радиоподавления навигационной аппаратуры потребителей с четырехэлементной адаптивной антенной решеткой для конфигурации противонавигационного поля радиопомех с расстановкой вида «квадрат».....	144
4.2.3 Оценка зон радиоподавления навигационной аппаратуры потребителей с семиэлементной адаптивной антенной решеткой для конфигурации противонавигационного поля радиопомех с	

расстановкой вида «квадрат» .....	149
4.3 Выводы по разделу 4.....	152
Заключение .....	153
Список сокращений и условных обозначений .....	154
Список литературы .....	156

## 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, характеризующаяся 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 [1-29]. 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].

Обсуждаемое выше внедрение в технику НАП СРНС перспективных средств помехозащиты 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 противонавигационное поле радиопомех в интересах объектово-территориальной защиты.

**Предметом исследования** является помехоустойчивость НАП СРНС, оснащенной средствами адаптивной пространственно-временной обработки сигналов, в условиях действия пространственно-распределенной 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 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, 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 защиты.

**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.), 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.).

**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.

# **1 ОПИСАТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ КАК ОБЪЕКТА РАДИОПОДАВЛЕНИЯ**

## **1.1 Принципы функционирования спутниковых радионавигационных систем**

Спутниковые радионавигационные системы предназначены для пассивных всепогодных непрерывных глобальных в реальном масштабе времени навигационных определений (НВО) военных, а также гражданских потребителей.

В настоящее время эксплуатируются две глобальные спутниковые радионавигационные системы: американская GPS и российская ГЛОНАСС. Кроме того, с 2005 г. разворачивается и вводятся в эксплуатацию европейская GALILEO и китайская COMPASS. Принципы построения и функционирования подсистем, входящих в состав глобальных СРНС, во многом аналогичны, что открывает возможность их совместного использования.

Основные достоинства СРНС состоят в следующем:

- глобальность рабочей зоны, в которой реализуются НВО;
- высокая точность определения пространственного (трехмерного) местоопределения, вектора скорости движения, а также системного времени космических, авиационных, морских и наземных потребителей;
- неограниченность числа обслуживаемых потребителей;
- непрерывность обслуживания потребителей;
- высокая скрытность и помехозащищенность.

В рамках данной работы в качестве объекта радиоподавления выбрана навигационная аппаратура потребителей, работающая по сигналам СРНС GPS на частоте 1575,42 МГц. Предложенные методики по оценке эффективности радиоподавления НАП (раздел 2) могут быть использованы при анализе других СРНС аналогичным образом.

## **1.2 Организация доступа в систему**

В СРНС GPS предусмотрено три основных уровня обслуживания – служба точного позиционирования, служба стандартного позиционирования и дифференциальный режим:

- служба точного позиционирования позволяет получать точное определение составляю-

щих вектора скорости и координат потребителя и имеет ограниченный доступ (для военных потребителей). В данном режиме используются защищенные сигналы P(Y) и M коды.

- служба стандартного позиционирования доступна всем пользователям системы GPS и предусматривает два режима с селективным доступом (с внедрением дополнительных преднамеренных ошибок в значении эфемерид навигационных спутников Земли (НСЗ)) и без него. В стандартном режиме используются сигналы C/A, L1C, L2C и L5 коды.

- дифференциальным режим использования системы основан на исключении различного рода систематических погрешностей при совместной обработке результата НВО в навигационной аппаратуре и аппаратуре опорной станции передачи данных.

### 1.3 Характеристики сигналов спутниковой радионавигационной системы GPS

Навигационные спутники Земли СРНС GPS излучают навигационные сигналы на трех частотах 1575.42 МГц (L1), 1227.6 МГц (L2) и 1176.45 МГц (L3). Для разделения сигналов с разных НСЗ используется кодовое разделение сигналов во всех частотных поддиапазонах, при этом фаза несущего колебания модулируется своим уникальным дальномерным кодом, сформированным на основе M-последовательностей [1]. Все излучаемые сигналы имеют правую круговую поляризацию.

На частоте L1 предполагается передавать четыре сигнала:

*Сигнал стандартной точности C/A*

Сигнал стандартной точности C/A доступен для использования всеми потребителями. Стандартный C/A код является кодом Голда с частотой следования символов 1.023 МГц и периодом повторения 1 мс. C/A дополнительно модулируется служебной информацией. C/A код имеет бинарную фазовую модуляцию (BPSK), принцип которой заключается в следующем: при переходе дальномерного кода из «0» в «1», фаза синусоидального сигнала несущей частоты меняется на 180°. Схема формирования C/A кода подробно изложена в [31].

Сигнал передачи служебной информации представляет собой двоичную последовательность с тактовой частотой 50 Гц. C/A код является основным сигналом для захвата P(Y) кода, который излучается в квадратуре с ним. Каждая эпоха C/A-кода синхронизирована с эпохой P(Y) кода.

*Защищенный сигнал высокой точности P(Y)*

Высокоточный сигнал формируется с помощью очень длинного дальномерного кода (P кода) и, аналогично C/A коду, имеет бинарную фазовую модуляцию. P код имеет высокую частоту следования символов дальномерного кода равную 10.23 МГц. Реальная длина P кода составляет одну неделю, т.к. каждую неделю происходит сброс генераторов в начальное состояние.

В системе GPS реализовано закрытие приема P кода для гражданских потребителей. Для этого введен специальный зашифрованный Y код, который представляет собой закрытие P кода с помощью перемножения на неизвестный W-код. Таким образом, захват P(Y) кода возможен только для лицензированных потребителей, обладающих специальным ключом, что позволяет обеспечить защиту НАП от дезинформирующих помех (anti-spoofing). Для захвата P кода используется специальная информация (Z-отсчеты) в составе служебной информации навигационного сообщения в форме ключевого слова HOW, и при приеме C/A кода используется как априорная информация о фазе P кода для уменьшения времени поиска. Когда поиск и захват C/A кода затруднен или невозможно его захватить из-за сложной помеховой обстановки, захват P кода возможен с помощью специальных блоков быстрого поиска сигнала, если известно точное время системы GPS в НАП. P(Y) код также модулируется служебной информацией с тактовой частотой 50 Гц. Схема формирования P кода показана в [32].

#### *Модернизированный военный сигнал M*

Модернизированный военный сигнал (M код) разработан для военного использования и, возможно, заменит сигнал P(Y). M код имеет модуляцию с цифровой поднесущей (BOCsin(10,5)). Цифровая поднесущая – это меандровое колебание, которое модулирует радиосигнал, уже модулированный дальномерным кодом. Для описания BOC модуляции используется два параметра: частота выборки символов дальномерного кода  $f_c$  и частота цифровой поднесущей  $f_s$ . Для BOC модуляции введено обозначение BOCsin( $m,n$ ), где  $m$  – коэффициент кратности частоты поднесущей базовой частоте 1,023 МГц ( $m = f_s/1.023$  МГц), а  $n$  – коэффициент кратности тактовой частоты дальномерного кода базовой частоты 1,023 МГц ( $n = f_c/1.023$  МГц). Границы смены символов дальномерного кода совпадают с границами символов цифровой поднесущей, при этом начальная фаза синусоидального колебания равна  $\varphi = 0^\circ$ .

M код обеспечивает большую помехозащищенность, чем P(Y) код. Преимущество M кода состоит в защищенности и спектральной изоляции от гражданских сигналов (C/A и L1C кодов), а также в том, что ему не требуется предварительной синхронизации с C/A-кодом. Частота следования символов дальномерного кода составляет 5.115 МГц, а частота модулирующего меандра 10.23 МГц.

Захват M кода может производиться следующим образом [32,33]:

- по служебной информации, полученной из навигационного сообщения, через C/A или P(Y);
- путем отдельного некогерентного накопления, используя модуляцию BOCsin(10,5);
- путем прямого поиска с помощью блоков быстрого поиска.

Для серии HC3 BlockIII и поздних модификаций мощность М кода планируется увеличивать в ограниченном регионе путем использования узконаправленных антенных систем, что позволит увеличить минимальную принимаемую мощность М кода до минус 138 дБВт [2].

#### *Гражданский коммерческий сигнал L1C*

Гражданский сигнал L1C определен в [34] и является двухкомпонентным сигналом, который состоит из 2 компонент: L1C<sub>p</sub> пилотный сигнал с временным мультиплексированием ВОС(1,1) и ВОС(6,1), обозначается как ТМВОС, без модуляции навигационным сообщением и сигнал L1C<sub>d</sub> с модуляцией ВОС(1,1), который модулируется навигационным сообщением. Дальномерные коды L1C<sub>p</sub> и L1C<sub>d</sub> представляют собой периодические последовательности с периодом 10 мс и символьной скоростью 1.023 МГц. Длина кодов составляет 10230 символов, что соответствует периоду повторения 10 мс. Данные коды относятся к модифицированным кодам Вейла [34].

Модуляция составного пилотного сигнала L1C<sub>p</sub> является ТМВОС(6,1,1/11). При этом чередование типов модуляции реализуется путем смены частоты цифровой поднесущей, где каждый период из 33-х бит дальномерного кода модулируется цифровой поднесущей так, что биты с номерами 1, 5, 7 и 30 модулируются по закону ВОС(6,1), а все остальные биты по закону ВОС(1,1). Таким образом, 1/11 энергии радиосигнала L1C<sub>p</sub> отводится на модуляцию ВОС(6,1), а 10/11 на модуляцию ВОС(1,1). Компонент ВОС(6,1) используется для повышения точности измерений фазы дальномерного кода в условиях многолучевого распространения сигнала и, в ряде случаев, ей можно пренебречь. Второй компонент L1C<sub>d</sub> имеет обычную модуляцию ВОС(1,1). При этом 75% энергии от общего сигнала L1C отводится на пилотную компоненту L1C<sub>p</sub>, а остальные 25% на сигнал с навигационными данными L1C<sub>d</sub>.

В таблице 1.1 приведены основные характеристики сигналов в диапазоне L1 СРНС GPS.

Таблица 1.1 - Основные характеристики сигналов СРНС GPS в диапазоне L1

Наименование	C/A	L1C		P(Y)	M
Несущая частота, МГц	1575.42	1575.42		1575.42	1575.42
Частотный диапазон	L1	L1		L1	L1
Метод доступа	CDMA	CDMA		CDMA	CDMA
Компонента сигнала	Данные	Данные	Пилот	Данные	н/д
Модуляция	BPSK(1)	ТМВОС(6,1,1/11)		BPSK(10)	ВОС-sin(10,5)
Частота поднесущей, МГц	-	1.023	1.023и 6.138	-	10.23
Частота символов, МГц	1.023	1.023		10.23	5.115
Длина первичного	1023	10230		$6.19 \cdot 10^{12}$	н/д

Наименование	C/A	L1C		P(Y)	M
дальномерного кода	(1мс)	(10мс)		(7 суток)	
Семейство кодов	Голд	Вейл		Комбинация циклических укороченных M-послед.	н/д
Длина вторичного дальномерного кода	-	-	1800 (длительность 0.01 сек)	-	н/д
Скорость данных, бит/с	50	50	-	50	н/д
Минимальная принимаемая мощность, дБВт	-158,5	-163	-158.25	-161,5	-159
		-157			

## 1.4 Построение и функционирование навигационной аппаратуры потребителей

### 1.4.1 Структура навигационной аппаратуры потребителей

НАП СРНС предназначена для определения пространственных координат и составляющих вектора скорости потребителя, текущего времени и других навигационных параметров в результате приема и обработки радиосигналов, излучаемых навигационными спутниками [1,32].

Для решения своей основной задачи НАП принимает излучаемые всеми НСЗ радиосигналы (доступные), выбирает рабочее созвездие НСЗ, осуществляет поиск радиосигналов по задержке и частоте, производит синхронизацию по всем компонентам модуляции радиосигналов, измеряет радионавигационными параметры этих радиосигналов, демодулирует навигационное сообщение от каждого НСЗ и обрабатывает полученную информацию, преобразуя ее в оценки времени, координат и параметров движения. Весь этот процесс называется навигационно-временным определением.

Современная НАП является аналого-цифровой системой, сочетающей аналоговую и цифровую обработку сигналов. Структурная схема НАП показана на рисунке 1.1.

Антенна выполняет функцию преобразования электромагнитных волн в электрический сигнал и может состоять из одного или нескольких антенных элементов с необходимыми блоками электронного управления ДН антенны в зависимости от назначения НАП. Наиболее распространенное применение получили слабонаправленные антенны и адаптивные антенные решетки, обеспечивающие управление положением главного лепестка и нулей диаграммы направленности антенны [1,4,5].

Радиочастотный блок предназначен для усиления принятых сигналов, частотной селекции

(фильтрации) полезных сигналов из смеси с шумами и помехами, двух-трех ступенчатого преобразования частоты в промежуточную.

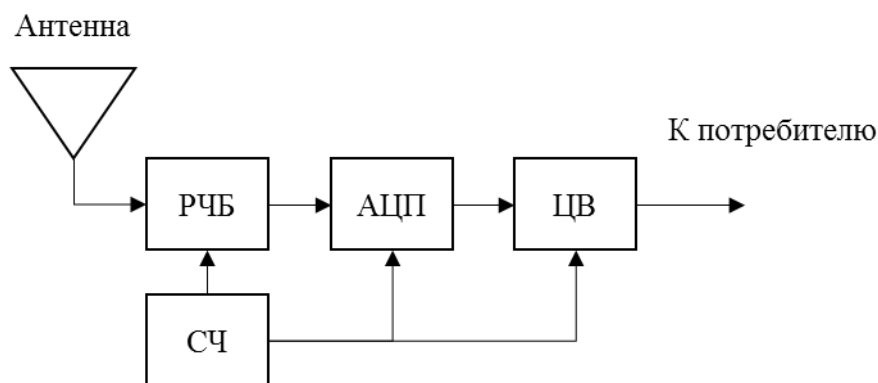


Рисунок 1.1 - Структурная схема НАП СРНС: РЧБ – радиочастотный блок; СЧ- синтезатор частот; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЦВ– цифровой вычислитель

Синтезатор частот и опорный генератор формируют набор гармонических колебаний, необходимых для работы РЧБ. К ним предъявляются достаточно высокие требования к стабильности частоты ( $10^{-11} \dots 10^{-7}$ ).

АЦП преобразует аналоговый сигнал на последней промежуточной частоте в цифровой сигнал, предназначенный для последующей обработки в ЦВ.

В свою очередь ЦВ можно разделить на процессор первичной обработки и процессор вторичной обработки. Процессор первичной обработки (сигнальный процессор) предназначен для:

- распараллеливания обработки входного сигнала на N-каналов;
- формирования опорных сигналов дальномерного кода и управляемых опорных генераторов;
- корреляционной обработки сигналов в каждом из N-каналов; поиска сигналов по задержке и частоте;
- слежения за дальномерным кодом, частотой сигналов и формирования оценок псевдодальности, псевдодоплеровской частоты и псевдофазы, выделения навигационных данных, оценки отношения сигнал/шум для принимаемых радиосигналов;
- привязки шкалы времени потребителя к системной шкале времени СРНС.

Канал приемника - часть приемника, предназначенная для приема сигналов от одного НСЗ. В одном канале приемника могут обрабатываться одновременно несколько сигналов одного НСЗ. Например, на рисунке 1.2 показана схема корреляторов одного канала приема для трех кодов СРНС GPS в диапазоне L1.

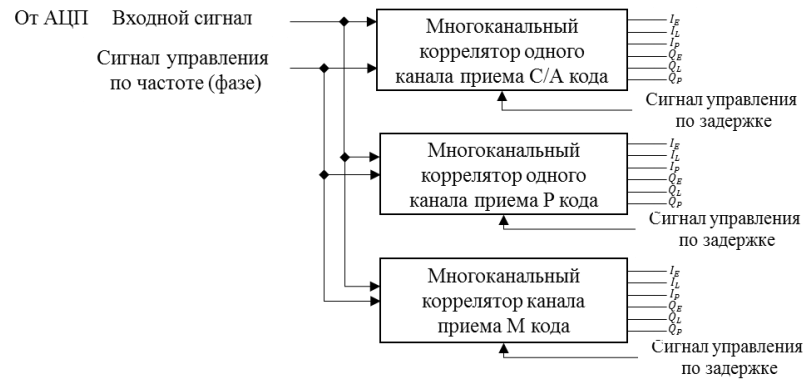


Рисунок 1.2 - Схема корреляторов одного канала приема сигналов НСЗ  
СРНС GPS в диапазоне L1

Канал приемника реализуется как в аппаратной части, так и в программной части. В аппаратной части все каналы работают параллельно. В программной части все каналы обслуживаются одним общим цифровым сигнальным процессором в режиме разделения времени.

Возможность выделения слабых сигналов на фоне более мощных собственных шумов обеспечивается за счет применения специальных видов когерентной обработки, применяемых в современной НАП.

Коррелятор в цифровой форме формирует отсчеты синфазных и квадратурных составляющих. Квадратурные  $Q_E$ ,  $Q_L$  и синфазные отсчеты  $I_E$ ,  $I_L$  используются в схеме слежения за задержкой, в то время как отсчеты  $I_P$ ,  $Q_P$  в схеме слежения за несущей (фазой). Для повышения точности слежения используют VE-VL корреляторы, которые имеют пять входов для повышения точности оценки задержки и для защиты от эффекта многолучевости, однако они обладают худшими параметрами помехоустойчивости в условия динамического воздействия на НАП. Уменьшение временного строба между соседними ветвями коррелятора повышает требования к частоте дискретизации вплоть до 50 МГц даже для сигнала C/A кода. Обычно частоту дискретизации выбирают в 5 раз больше частоты следования символов дальномерного кода. Структурные схемы и алгоритмы работы корреляторов подробно разобраны в [1,32].

На входе приемника вся мощность навигационных сигналов (НС) «распределена» в собственной полосе частот сигнала и находится существенно ниже уровня собственных внутренних шумов приемника. Отсюда следует, что на выходе избирательной системы (коррелятора) при неизвестной структуре входного навигационного сигнала мощность шума будет превышать мощность сигнала. Следовательно, любой сигнал, превосходящий по мощности уровень внутреннего шума, будет считаться помехой, что эффективно реализовано в ААР, которые широко используются в помехозащищенных образцах НАП.



## 1.4.2 Алгоритмы обработки навигационного сигнала

Первичная обработка НС обычно содержит следующие операции:

- формирование опорных сигналов, соответствующих дальномерным кодам спутников;
- корреляционную обработку принимаемых сигналов;
- поиск сигналов спутников по задержке и частоте, захват на слежение и слежение за задержкой дальномерных кодов, частотой, фазой принятых сигналов;
- формирование оценок псевдодальности, псевдодоплеровской частоты и псевдофазы;
- выделение навигационных данных, содержащихся в НС;
- формирование оценок величины отношения сигнал/шум;
- привязку шкалы времени потребителя к системной шкале времени СРНС.

Вторичная обработка НС предполагает:

- декодирование навигационной информации (телеметрии, альманахов и эфемерид);
- формирование оценок координат носителя НАП и составляющих вектора его скорости;
- комплексирование НАП с другими средствами навигации (например, с инерциальными);
- обмен информацией с потребителем.

### 1.4.2.1 Алгоритмы поиска и захвата навигационного сигнала

Поиск и захват навигационного сигнала на сопровождение схемами слежения за фазой, частотой и задержкой огибающей дальномерного во многом зависит от априорной информации о своем местоположении, целостности СРНС и производительности аппаратуры НАП.

В режиме поиска используются квадратурные составляющие  $I_p$ ,  $Q_p$ , а задача обнаружения сигнала в элементарной ячейке поиска решается в соответствии с алгоритмом:

$$I_p^2 + Q_p^2 \geq h,$$

где  $h$  – порог, выбираемый из условия обеспечения заданной вероятности правильного обнаружения ( $D$ ) и вероятности ложной тревоги ( $F$ ). Область поиска сигнала разбивается на множество ячеек, каждой из которых соответствует сигнал со своим сочетанием частоты и задержки огибающей дальномерного кода. Шаг поиска обычно равен половине длительности символа дальномерного кода. Шаг поиска по частоте зависит от времени когерентного накопления сигнала в

корреляторе, поэтому количество каналов поиска по частоте пропорционально времени когерентного накопления сигнала.

Существует множество публикаций, в которых рассмотрены различные виды поиска сигнала [1,32]. Виды поиска можно подразделить в зависимости от способа просмотра области поиска на параллельный, последовательный и параллельно-последовательный. С постоянным и переменным временем анализа в элементе разрешения области поиска. Временные и вероятностные характеристики различных видов поиска представлены в [32].

В настоящее время распространенной практикой является создание специальных блоков поиска. С появлением таких блоков поиска произошло разделение разновидностей каналов корреляторов. Традиционный канал коррелятора, предназначенный для слежения за сигналом, требует достаточно большое количество ресурсов для реализации. Поэтому каналов сопровождения в приёмниках обычно немного от нескольких десятков до пары сотен. Каналы блока поиска устроены иначе. Управление каждым отдельным каналом блока поиска невозможно. Все каналы блока поиска настраиваются на анализ определённой области по задержке и частоте, параметры опорных сигналов в каналах блока поиска взаимосвязаны. Это позволяет применить различные схемы упрощения алгоритма и существенно сэкономить на аппаратных ресурсах. В результате количество каналов коррелятора в аппаратных блоках поиска оказывается существенно больше, чем каналов сопровождения. Это позволяет реализовать параллельный или близкий к нему последовательно-параллельный поиск сигнала. Таким образом, модуль приема и обработки навигационных сигналов реализуется в виде микросборки, в состав которой входят: навигационный процессор с каналами слежения, блока быстрого поиска сигналов, оперативного и постоянного запоминающих устройств.

Например используются следующие виды блоков поиска [1], как наиболее распространенные:

- последовательный на корреляторах, использующихся для слежения за параметрами сигналов НС. Использование корреляторов с 3, 5, 7 ветвями позволяет увеличить скорость анализа ячеек в пропорциональное число раз. Обычно число корреляторов для слежения не превышает 100 - 200 шт.

- параллельный поиск на параллельных корреляторах – блоки быстрого поиска. Современные блоки быстрого поиска сигналов обладают количеством эквивалентных корреляторов свыше 1 млн.

#### **1.4.2.2 Время накопления фрагмента навигационного сигнала**

Традиционная задача поиска сигнала предполагает, что необходимо провести поиск в

определённой области частоты и задержки огибающей сигнала с заданным отношением сигнал/шум. С точки зрения чувствительности, характеристики алгоритма поиска зависят от времени накопления сигнала в корреляторе. Для повышения чувствительности, а, следовательно, и помехоустойчивости приемника, используют следующие способы увеличения отношения сигнал-шум:

- некогерентное суммирование, заключается в некогерентном суммировании отсчетов сигнала I и Q. При увеличении длительности некогерентного накопления в два раза выигрыш по отношению сигнал/шум составляет 2 дБ. Но шаг поиска по частоте в этом случае не изменяется, поэтому количество каналов поиска по частоте увеличивать не требуется.

$$\sum_{i=1}^N I_i^2 + Q_i^2 \geq h$$

- когерентно-некогерентное, заключается в увеличении времени когерентного накопления с последующим некогерентным суммированием выходных отсчетов сигнала I и Q. При увеличении длительности когерентного накопления в два раза выигрыш по отношению сигнал/шум составляет 3 дБ. Однако в то же время шаг поиска по частоте при этом сокращается в два раза. Таким образом, количество каналов поиска необходимо увеличить в два раза, что увеличивает время поиска – 4 раза (при последовательном поиске).

$$\sum_{i=1}^N \left( \sum_{i=1}^{Nk} I_i^2 + \sum_{i=1}^{Nk} Q_i^2 \right) \geq h.$$

- когерентное накопление путем прямого увеличения времени накопления. В системах GPS и Galileo присутствует модуляция навигационным сообщением, которая не позволяет накапливать сигнал на длительности больше, чем длительность символа навигационного сообщения (обычно 20 мс). Однако, если в предыдущем сеансе приема навигационная информация была получена полностью, то можно предсказать моменты времени, когда ожидается следующая смена символа навигационного сообщения, и путем инвертирования входного сигнала накапливать когерентно на более длительном интервале времени.

### 1.4.2.3 Оптимизация области поиска

В зависимости от наличия в НАП информации о текущем положении носителя, системном времени, дате, альманахе и эфемеридах выделяют три режима работы на этапе поиска (допоиска) и захвата НС - «холодный», «тёплый» и «горячий» старты:

- под «холодным» стартом понимается режим работы НАП, при котором приемник не обладает информацией о системном времени, своих координатах, альманахе СРНС и эфемеридах НСЗ. При «холодном» старте поиск НС по задержке и доплеровской частоте осуществляется в

полном диапазоне. Поиск непериодических закрытых НС в данном режиме невозможен.

- под «тёплым» стартом понимается режим работы НАП, при котором известно системное время и координаты НАП (например, от инерциальной системы), а также известен последний альманах СРНС. Режим «теплого» старта обычно возникает при включении приёмника после достаточно продолжительного периода времени, когда он был отключен (от нескольких минут до нескольких дней). В этом режиме приемник может определить текущие координаты рабочего созвездия НСЗ и доплеровское смещение частоты, что позволяет существенно сузить диапазон поиска по частоте. Точности данных в режиме «теплого» старта недостаточно для существенного сужения диапазона поиска по задержке. Обычно точность оценки положения спутника составляет 10 км, а точность оценки скорости — 100 м/с.

- под «горячим» стартом понимается режим работы НАП, при котором известно текущее время, положение НАП, альманах СРНС и эфемериды видимых НС, что позволяет с высокой точностью предсказать задержку НС и доплеровское смещение частоты. Если ошибка местоопределения и времени не превышает половины длительности символа дальномерного кода (линейного участка детектора задержки), то тогда возможен мгновенный захват при потере сигнала, так как среднеквадратическая ошибка слежения находится на линейном участке дискриминационной характеристики детектора.

В таблице 1.2 приведена сводная таблица необходимой информации на различных стадиях поиска и захвата НС.

Таблица 1.2 - Оптимизация области при различных режимах работы НАП

Режим работы НАП	Этап обработки информации			
	Поиск	Захват	Битовая синхронизация	Кадровая синхронизация
Холодный старт	Да*	Да	Да	Да
Теплый старт	Да**	Да	Да	Да
Горячий старт	Да***	Да	Нет	Нет
Перезахват (допоиск)	Нет	Да****	Нет	Нет
Примечание: * - поиск во всем диапазоне по частоте и задержке для всех спутников; ** - поиск во всем диапазоне по частоте и задержке только видимых спутников; ***- поиск в нескольких ячейках по частоте и задержке только видимых спутников, при наличии грубой информации о текущем местоположении. **** - мгновенный перезахват при наличии дополнительных отводов с линиями задержки в канале коррелятора и наличии точной информации о текущем местоположении.				

После кратковременной потери сигнала (срыве слежения) при повторном поиске (допоиске) нет необходимости в битовой и кадровой синхронизации, так как существенного смещение границ символа дальномерного кода (С/А) произойдет при изменении взаимного расположения НСЗ и НАП на 300 км. Для P(Y) кода, например, ошибка кадровой синхронизации приведет к невозможности выполнить допоиск. Если битовая синхронизация не определена, то НАП не сможет решить навигационную задачу. Успешный допоиск по дальномерному коду, обладающему высокой длительностью, например, P код, гарантирует битовую синхронизацию в пределах 1 мс. В свою очередь битовая синхронизация будет зависеть от отношения сигнал/шум в канале демодуляции навигационных данных (на выходе системы слежения за фазой) и при низком отношении не позволит осуществить синхронизацию.

#### 1.4.2.4 Следящие системы

Приемник может точно отслеживать принимаемый сигнал навигационного спутника, даже если он принимает его с очень низким уровнем мощности (обычно значительно ниже внутреннего шума приемника).

Для измерения несущей частоты сигналов используется система слежения за несущей. В комбинированной системе слежения на первом этапе производится синхронизация по частоте с помощью системы частотной автоподстройки частоты (ЧАПЧ), на втором – фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). В НАП после обнаружения НС автоматически включается система ЧАПЧ и некогерентная система слежения за задержкой (ССЗ) огибающей дальномерного кода НС. Система ЧАПЧ осуществляет предварительную оценку доплеровского сдвига частоты и скорости ее изменения, что необходимо для ввода в систему слежения системы ФАПЧ, затем после некоторого времени работы ФАПЧ включается когерентная ССЗ. После завершения переходных процессов в ФАПЧ и ССЗ приемный канал НАП переходит в устойчивый режим синхронизации сигнала по фазе (частоте) и задержке огибающей сигнала, после чего производится прием специальной информации.

Различают два типа НАП: когерентная и некогерентная. Они различаются тем, что в когерентной для слежения за несущей используется система ФАПЧ, а в некогерентной система ЧАПЧ. Наиболее слабым звеном является система слежения за несущей, при срыве которой следом происходит срыв слежения за задержкой, при этом некогерентная НАП обладает большей помехоустойчивостью до 6 дБ относительно когерентной НАП [1].

Основными источниками ошибок в ФАПЧ, ЧАПЧ и ССЗ является флуктуационная ошибка [1,32], зависящая от отношения сигнал/шум, и динамическая составляющая ошибки слежения. Динамическая ошибка слежения зависит от динамики (маневрирования, ускорения) НАП, длины волны сигналов НС, полосы следящей системы и не зависит от отношения сигнал/шум.

Следовательно, радиоподавление помеховыми сигналами не может повлиять на динамическую ошибку слежения. В дальнейшем будем полагать, что НАП используется в оптимальных условиях, при которых динамическая ошибка слежения является пренебрежимо малой величиной. Типовая эквивалентная шумовая полоса ФАП лежит в интервале от единиц Гц для комплексированной и низкочастотной НАП до десятков Гц для динамической НАП [1].

Для повышения помехоустойчивости следящих систем используют комплексирование НАП и инерциальных навигационных систем (ИНС) на уровне первичной обработки, поскольку именно там производится слежение за сигналами НС и узлы этого уровня более подвержены воздействию помех [1,6]. При комплексировании с ИНС информацию о динамике объекта используют в схеме слежения за несущей, а отсюда данные о динамике поступают в схему слежения за задержкой огибающей. Таким образом, шумовую полосу системы слежения за несущей уменьшают до уровня стационарной НАП, что существенно повышает отношение сигнал/шум в канале слежения.

### **1.5 Помехозащита навигационной аппаратуры потребителей**

Современные образцы НАП как объекты радиоподавления характеризуются тем, что:

- мощность НС на входе приемника НАП, расположенного у поверхности Земли, значительно ниже уровня мощности собственного шума приемника (порядка минус 155 дБВт и менее);
- динамический диапазон приемников НАП обычно относительно невелик (20...75 дБ);
- сетки рабочих частот СРНС известны;
- границы доплеровского смещения частоты НС известны;
- законы модуляции навигационных сообщений, структура передаваемых кадров, дальномерные коды (в гражданском сегменте) известны.

Сказанное позволяет заключить, что НАП СРНС уязвима для постановщиков преднамеренных радиопомех. Уязвимость имеет место на всех этапах обработки НС. Поэтому актуальны исследования, направленные на разработку способов помехозащиты НАП. Ниже приведен краткий обзор основных видов преднамеренных радиопомех и известных способов защиты НАП от них. Материалы данного раздела опубликованы в работе автора [35].

#### **1.5.1 Основные виды преднамеренных помех**

Преднамеренные радиопомехи по принципу их мешающего действия на НАП можно разделить на четыре основные группы: *маскирующие, дезинформирующие, искажающие и ослепляющие*.

*Маскирующая помеха* создает на входе приемника НАП фон, протяженный по времени и по частоте, затрудняющий обнаружение НС и измерение их информативных параметров.

К основным типам активных маскирующих радиопомех, применение которых для подавления НАП следует ожидать, относятся:

- активные шумовые помехи, прицельные по несущим частотам НС [36];
- гармонические помехи с фиксированной или перестраиваемой частотой в пределах полосы пропускания приемников НАП [7];
- фазоманипулированные помехи, представляющие собой гармонические колебания на частотах НС, модулированные по фазе различными бинарными кодами [37], которые подразделяются на:

1) заградительные сигналподобные помехи, формируемые с помощью генераторов, рассмотренные в [37];

2) помехи внутрисистемного происхождения, создаваемые путем ретрансляции НС совокупности НСЗ, описанные в [38,39].

*Дезинформирующая (имитирующая) помеха* создает ложные НС, действующие в элементах разрешения НАП по времени и/или по частоте, не совпадающих с элементами, где присутствуют истинные НС. Если эти НС не идентифицируются средствами помехозащиты, имеющимися в составе НАП, как «ложные НС», то они захватываются (при определенных условиях) на слежение. Выполненные по ложным НС измерения вносят аномальные ошибки в результаты НВО. Величина ошибок, в общем случае, зависит от количества созданных ложных НС и от близости их параметров и параметров истинных НС. Однако можно утверждать, что если НАП не способна эффективно идентифицировать ложные НС, то в условиях действия дезинформирующих помех она с высокой вероятностью окажется неработоспособной (подавленной).

Главное требование к имитирующим помехам – достаточная степень близости совокупности параметров истинных НС и создаваемых ложных НС, на базе которой НАП решает задачи идентификации НС.

Возможные типы имитирующих помех различаются по способам их формирования. К ним относятся:

- имитирующие помехи генераторного типа, создающие ложные НС с фиксированными параметрами в различных элементах разрешения НАП, либо с управляемыми параметрами (уводящие по задержке и/или частоте). Такие помехи могут быть сформированы с помощью специальных генераторов – имитаторов НС [40], если известны коды НС, альманах СРНС и эфемериды НСЗ [37];

- имитирующие помехи, создаваемые на базе аналоговых или цифровых устройств запоминания и воспроизведения радиосигналов [41];

- имитирующие помехи, формируемые на базе ретрансляторов радиосигналов [42,43].

*Искажающая помеха* в отличие от имитирующей помехи действует в том элементе разрешения по временной задержке и частоте, где присутствует истинный НС. Аддитивное взаимодействие такой помехи с истинным НС приводит к искажению сигнальной функции измерителя временной задержки НС, каковой является огибающая функция взаимной корреляции дальномерного кода, принимаемого НС, и опорного кода, формируемого в НАП. Действие искажающей помехи приводит к увеличению нормальной ошибки фиксации момента максимума функции взаимной корреляции. Следствием этого является увеличение нормальной ошибки измерения псевдодальности. Основными известными типами искажающих помех являются:

- прицельные по частоте и коду сигналоподобные помехи генераторного типа [37];
- следящие сигналоподобные помехи генераторного типа [37];
- хаотические импульсные помехи (ХИП) в виде потоков коротких радиоимпульсов (длительность импульсов сравнима с длительностью символа кода НС) с достаточно большой импульсной мощностью;
- пассивные помехи в виде отражений, создаваемых участками подстилающей поверхности, «местными предметами» и, возможно, специальными отражателями, расположенными в текущий момент в непосредственной близости от носителя НАП [44].

В [37] отмечается, что искажающие помехи указанных выше типов (прицельные и следящие) формируются с использованием внешних целеуказаний от подсистемы радиомониторинга индивидуально для каждого НС, принимаемого НАП, в конкретный момент времени. Однако, получение таких целеуказаний является сложной задачей [37], в связи с чем использование прицельных по коду и частоте, а также следящих сигналоподобных помех в интересах радиоподавления не только гражданских, но и закрытых НС в настоящее время проблематично.

*Ослепляющая помеха* – это узкополосное излучение на частоте НС, мощность которого на входе приемника подавляемой НАП в полосе его пропускания достаточна для перегрузки приемника. Возможными типами помех, которые могут обладать ослепляющим действием, являются указанные выше гармоническая помеха, а также узкополосная шумовая помеха и помеха типа ХИП. Эффективность ослепляющей помехи как средства радиоподавления НАП зависит от расстояния между ПАП и носителем НАП, а также от величины динамического диапазона приемника НАП. При небольших расстояниях до подавляемой НАП действие этих помех может приводить к насыщению приемных устройств НАП даже при их относительно небольшой мощности.

Разрядность АЦП определяет верхнюю границу эффективности работы цифровых устройств средств помехозащиты (максимальное отношение помеха/собственный шум). Для того чтобы АЦП не входил в насыщение при воздействии мощной помехи, ее среднеквадратическое значение амплитуды не должно превышать одной трети от максимальной амплитуды входного



сигнала

$$\sigma_n \leq \frac{2^{D-1}}{3} = \sigma_{max}.$$

Если принять амплитуду собственного шума приемника за единицу, то максимальное отношение помеха/собственный шум равно  $20 \log_{10} \sigma_{max}$ . Например, для 14-разрядного АЦП максимальное отношение помеха/собственный шум равно 68 дБ. В реальном АЦП к уровню собственного шума приемника добавляется шум АЦП, обусловленный дрожанием апертуры и дифференциальной нелинейностью [45].

### 1.5.2 Способы защиты от маскирующих помех

Известные способы защиты от активных маскирующих помех (АП) основаны на пространственно-временной, частотно-временной и корреляционной обработке сигналов, действующих на входе приемника НАП, а также на специальных мерах, позволяющих увеличить мощность полезных НС в зоне расположения носителей НАП. Цель защиты от АП – увеличение отношения сигнал/помеха на выходе устройства защиты и коррелятора НАП.

*Пространственно-временная обработка* позволяет реализовать пространственную режекцию помех и пространственную селекцию полезных НС. Пространственная режекция реализуется путем формирования «нулей» в ДН антенной решетки (АР) в направлениях на источники помех. Пространственная селекция предполагает формирование такой ДН антенной решетки НАП, при которой ее максимумы ориентированы на полезные НСЗ.

Большинство типов НАП СРНС используют одноэлементную антенну с фиксированной ДН, главный лепесток которой ориентирован в верхнюю полусферу и перекрывает всю область «выше линии горизонта», где расположены полезные НСЗ. Постановщики активных помех могут действовать с любых угловых направлений в пределах этой области. Для защиты от них НАП может использовать антенны в виде многоэлементных ААР, которые позволяют формировать «нули» в ДН АР в направлении источников помех и максимумы – в направлении полезных НСЗ. Возможное количество «нулей» на единицу меньше числа элементов АР [4]. В настоящее время, разработаны ААР с количеством антенных элементов 4 и 7, которые позволяют обеспечивать формирование «точечных» провалов в направлении трех и пяти ПАП соответственно, при этом коэффициент улучшения отношения сигнал/помеха на выходе ААР может достигать 56 дБ и более [1,5,30,8].

*Частотно-временная обработка* позволяет реализовать компенсацию и частотную режекцию помех. Компенсация заключается в вычитании сформированной копии (оценки) помехового сигнала из входного наблюдения [1]. Многообразие вариантов построения компенсаторов

помех определяется способами формирования оценки помехового сигнала, при этом существенную роль играет априорная информация о структуре и параметрах помехового сигнала. Режекция в частотной области предполагает формирование амплитудно-частотной характеристики линейного фильтра с «провалами» в зонах, где сосредоточены спектральные составляющие помех. Известны компенсаторы с формированием оптимальных оценок параметров помехи [7], компенсаторы, построенные на базе адаптивных трансверсальных фильтров [9], и режекторные фильтры на основе алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ) [46].

В [1] отмечается следующее:

- компенсатор с оптимальной оценкой параметров помехи может обеспечить эффективное подавление одиночной узкополосной помехи и работоспособность НАП при отношении помеха/сигнал до 100...120 дБ.

- компенсатор на базе адаптивного трансверсального фильтра эффективно работает при воздействии до трех узкополосных помех с шириной спектра 1...5 кГц и обеспечивает работоспособность НАП при отношении помеха/сигнал до 80...90 дБ;

- компенсатор в форме режекторного фильтра в частотной области, построенного на базе алгоритма БПФ, обеспечивает работу НАП при отношении помеха/сигнал до 60...70 дБ при воздействии до 10 помех, общая протяженность спектра которых не превышает 10% ширины спектра полезного сигнала.

*Корреляционная обработка сигналов*, действующая на входе приемника НАП, реализуется на базе корреляторов, имеющихся в составе НАП всех типов, на этапе первичной обработки НС. Корреляционная обработка, наряду со своим прямым назначением - обеспечением кодового доступа НАП к НС НСЗ, реализует накопление энергии обрабатываемых фрагментов НС. За счет этого происходит резкое увеличение отношения сигнал/помеха на выходе коррелятора. Таким образом, корреляторы, имеющиеся в составе НАП всех типов, являются мощным средством защиты от АП.

В [38] показано, что коррелятор эффективно подавляет также помехи внутрисистемного происхождения, а также формируемые на их основе преднамеренные помехи «внутрисистемного типа».

*Повышение мощности НС в зоне расположения носителей НАП* направлено на увеличение отношения сигнал/помеха на входе приемников НАП. Поколение НСЗ, эксплуатируемых в настоящее время, использует слабонаправленные антенны излучения НС. Увеличение защищенности НАП от преднамеренных помех предполагается обеспечить за счет повышения энергопотенциала излучаемых НС (на величину около 20 дБ) путем использования в спутниках нового поколения высоконаправленных антенн [2]. Указывается, что применение высоконаправленных антенн перспективно для формирования поля НС в относительно небольших областях, например,

в зонах локальных вооруженных конфликтов.

Другой подход к увеличению мощности НС на входе НАП заключается в развертывании локальных радионавигационных систем на основе «псевдоспутников». Примером является функциональное дополнение к СРНС ГЛОНАСС на основе псевдоспутников [47]. Псевдоспутники это приемопередающие устройства, расположенные на поверхности Земли, которые осуществляют прием НС истинных НСЗ, синхронизацию с радионавигационной системой, обработку, усиление и излучение сигналов, схожих по структуре с истинными НС. Такой подход позволяет увеличить мощность НС на входе НАП и получить высокоточное определение координат (ошибка до 5...10 см) относительно псевдоспутников. Это реализуется за счет отсутствия эфемерид и ионосферных ошибок наземных станций и их оптимального геометрического расположения. Повышенная мощность наземных передатчиков (1...10 Вт) и возможность перестройки рабочей частоты НС псевдоспутников повышает уровень защищенности НАП в условиях создания противником преднамеренных помех на театре военных действий. Рассматривается также вариант псевдоспутников на базе беспилотных летательных аппаратов, которые могут обеспечить увеличение мощности НС на входе НАП на величину до 40 дБ [2].

### 1.5.3 Способы защиты от имитирующих (интеллектуальных) помех

Способы защиты от имитирующих помех основаны на выявлении факта воздействия (обнаружении) ложных НС, создаваемых постановщиками имитирующих помех (ИМП), и на исключении их влияния на результаты решения навигационной задачи. К известным способам относятся следующие:

*1 Способы обнаружения ИМП, основанные на мониторинге величины отношения сигнал/шум (ОСШ) на входе приемника НАП.* Диапазон изменения мощности НС на входе НАП приблизительно известен, поэтому любое аномальное изменение этой величины может быть использовано для обнаружения ИМП.

В [10] описан способ обнаружения ИМП, основанный на анализе выходного напряжения блока автоматической регулировки усиления (АРУ). Присутствие ложных НС увеличивает суммарную мощность в полосе пропускания приемника НАП, что приводит к изменению уровня управляющего напряжения АРУ. Анализ изменений этого напряжения позволяет выявить наличие аномального увеличения входного ОСШ. В [11] предложен обнаружитель ложных НС на основе сравнения текущего входного ОСШ со средним значением ОСШ. Среднее значение ОСШ формируется по итогам накопления данных об изменениях ОСШ на отрезке времени анализа.

*2 Способы обнаружения ИМП, основанные на мониторинге относительной мощности*

*НС разных частотных диапазонов.* Современная НАП может работать одновременно на нескольких частотах (например, L1 и L2 применительно к системе GPS). Анализ относительной мощности истинных НС между различными диапазонами частот можно использовать для обнаружения ИМП [13]. Например, в системе GPS сигналы частотного диапазона L1 имеют минимальную мощность минус 161.5 дБВт для сигнала высокой точности с кодом P(Y) и минус 158.5 дБВт для сигналов стандартной точности с кодом C/A. Таким образом, аномальная разница между мощностью НС, либо отсутствие одного из сигналов (например, на частоте L2) при попытке создания ИМП может послужить маркером для ее обнаружения в НАП.

*3 Способы обнаружения ИМП, основанные на мониторинге ОСШ на выходах разнонаправленных антенн [14].* Предполагается использование в НАП гибридной антенны, состоящей из несимметричного вибратора и т.н. «патч-антенны», подсоединенной к двум независимым блокам обработки НС. «Патч-антенна» имеет максимум ДН в направлении зенита, в то время как несимметричный вибратор имеет в этом направлении минимум ДН. Различия в величине ОСШ, полученные на выходах разнонаправленных антенн, могут быть использованы для обнаружения присутствия ИМП.

*4 Способы обнаружения и ослабления ИМП, основанные на пространственно-временной обработке НС.* Имитатор, как правило, формирует одновременно несколько ложных НС, то средством защиты от ИМП может быть специальная пространственно-временная обработка сигналов с анализом их пространственной коррелированности. Задача обнаружения ИМП сводится к обнаружению пространственно-коррелированных НС и определения направления их прихода, после чего ААР формирует «провалы» в ДН антенны в направлении обнаруженного имитатора, что обеспечивает ослабление ложных НС [15].

*4.1 Способ обнаружения ИМП, основанный на сравнении фаз НС на выходах двух разнонаправленных антенн [16].* Зная координаты и ориентацию антенн, расстояние между ними (базу), а также распределение ошибок фазовых измерений, можно обнаружить присутствие ИМП. Алгоритм обнаружения ИМП заключается в следующем. Для каждого НС вычисляется ожидаемая разность фаз на основе знания положения антенн и базы. Измеренная разность фаз сравнивается с ожидаемой для каждого НС. Разность ожидаемых и измеренных величин сравнивается с порогом, зависящим от статистики фазовых ошибок. Превышение порога означает присутствие ИМП. Недостатками этого способа являются необходимость калибровки антенн и большие временных затраты на анализ НС. При реализации способа на движущихся объектах требуется интеграция с внешними источниками навигационной информации (например, ИНС).

*4.2 Способ обнаружения и ослабления ИМП, основанный на пространственно-временной обработке НС в ААР [15].* Способ реализуется в три этапа: выявление пространственно-коррели-

рованных НС, формирование провалов ДН антенны в направлении пространственно-коррелированных НС, формирование максимума ДН антенны в направлении истинных НС. Способ успешно работает, если суммарная мощность пространственно-коррелированных ложных НС значительно превышает среднюю мощность истинных НС [17]. Эффективность способа уменьшается с ростом числа имитаторов и при изменении их пространственного положения по углу места и азимуту относительно плоскости ААР.

4.3 *Способ обнаружения ИМП, основанный на реализации пространственно-временной обработки в синтезированной антенной решетке* [11,18]. Подвижный приемник через некоторые интервалы времени измеряет амплитуды и фазы НС, за которыми осуществляется слежение. По результатам этих измерений формируются вектора данных с выходов корреляторов, размерность которых определяется числом выполненных измерений. Признаком, по которому производится обнаружение ИМП, является то, что вектора данных, относящихся к ИМП, будут коррелированы для всех ложных НС, излучаемых одиночным имитатором, в то время как для истинных НС данные будут не коррелированы, поскольку истинные НС зависят от траекторий движения НСЗ. Данный способ работоспособен даже в условиях многолучевости, так как все ложные НС, излучаемые постановщиком ИМП, испытывают одинаковые замирания на пути распространения и одинаково подвергаются рефракции.

5 *Способы обнаружения ИМП, основанные на сравнении результатов НВО с данными от внешних навигационных устройств.*

5.1 *Способ обнаружения ИМП, использующий несколько (2 или более) комплектов НАП с антеннами, расположенными в известных точках* [19]. Предполагается, что воздействие ИМП на группу НАП вызовет искажения НВО, схожие для всех НАП. Однако НВО, полученные различными НАП по истинным НС, существенно отличаются друг от друга. Таким образом, способ обнаружения ИМП основан на сравнении результатов решения навигационной задачи группой НАП. Решение о присутствии ИМП выносится, если полученные НВО слишком близки друг к другу для каждой НАП. Для проверки истинности НВО могут быть использованы также приемники НАП, работающие одновременно по нескольким СРНС.

5.2 *Способ обнаружения ИМП, основанный на совместном использовании НВО, полученных по открытому и закрытому каналам* [20]. Этот способ предполагает использование защищенного приемника, работающего по закрытым сигналам, для верификации принимаемых истинных НС стандартной точности в гражданском приемнике.

5.3 *Способ обнаружения ИМП, основанный на использовании дополнительной навигационной информации.* Верификация НВО в НАП может быть реализована с помощью автономных навигационных систем (ИНС, высотомеры, одометры, корреляционно-экстремальные навига-

онные системы). При этом использование вспомогательных датчиков может существенно сократить область поиска НС или время их «перезахвата». Отмечается, что такой способ обладает некоторыми ограничениями. Они связаны с тем, что ИНС характеризуются нестационарным характером изменения собственной погрешности, т.к. имеет место накапливающаяся ошибка.

*6 Способы обнаружения ИМП на основе мониторинга задержки НС и границ навигационного сообщения*

6.1 Способ обнаружения ИМП, предлагаемый в [21], заключается в анализе задержки навигационного сообщения и мониторинге скачков временного положения границ слотов навигационных данных. Если при анализе НС происходит скачок границ навигационного сообщения раньше прогнозируемого времени (20 мс), то этот НС идентифицируется как ложный. Отмечается, что такой способ обнаружения ИМП сложен и ненадежен на границах обновления эфемеридных данных, а также при восходе и заходе НСЗ на горизонте из-за низкого ОСШ.

6.2 Способ обнаружения ИМП, основанный на анализе относительной задержки НС разных диапазонов частот [13]. Как известно, НСЗ излучают НС одновременно на нескольких несущих частотах. Например, приемники системы GPS могут принимать сигналы на двух частотах L1 и L2. Кросс-корреляция между одинаковыми сигналами на частотах L1 и L2 (например,  $P(Y)$ ) вызовет по крайней мере один корреляционный пик. Поскольку сигналы на частоте L2 имеет большую задержку по сравнению с сигналами на частоте L1 из-за ионосферного эффекта, взаимная задержка НС, принимаемых на частотах L1 и L2, известна. Присутствие дополнительных кросс-корреляционных пиков с аномальной задержкой позволяет обнаруживать ИМП.

7 Способ защиты от ИМП, основанный на криптографической аутентификации. Современные образцы НАП СРНС оснащены средствами аутентификации пользователей. Методы шифрования активно используются в военных приложениях (GPS, ГЛОНАСС и других), таким образом ограничивается доступ неавторизированных пользователей к структуре навигационного сообщения. Отмечается, что такой способ является наиболее эффективным способом защиты от ИМП. Поэтому для создания ИМП для НАП, работающей по закрытым НС, используют ретрансляторы НС. Образцы НАП, работающие с гражданскими НС, уязвимы для ИМП, так как информация о них является открытой и содержится в интерфейсных документах СРНС.

8 Способ обнаружения ИМП, основанный на мониторинге изменения задержки и доплеровского смещения частоты НС [13]. Данный способ основан на анализе скорости изменения задержки и частоты НС. Для создания эффективной ИМП подвижной НАП необходимо, чтобы скорость изменения задержки ложного НС, создаваемого с помощью имитатора, не превышала некоторый заданный порог, в противном случае она может быть обнаружена за счет анализа выходной информации с контуров слежения за задержкой. Если относительная скорость и координаты

наты НАП относительно каждого НСЗ могут быть определены, то можно обнаружить аномальное значение доплеровского смещения частоты ИМП. Таким образом, информация, получаемая с выходов контуров слежения за задержкой и частотой, может быть использована для обнаружения ИМП.

9 *Способ обнаружения ИМП, основанный на контроле целостности эфемеридной информации* [13]. Эфемеридная информация, полученная из навигационного сообщения, позволяет определить координаты и траекторию движения НСЗ. Любое несоответствие координат спутника (заложенное в навигационное сообщение ложного НС) с полученным альманахом может привести к обнаружению ИМП. Этот способ гарантирует, что постановщик ИМП «не может использовать собственные координаты как координаты навигационного спутника» [13].

10 *Способ обнаружения ИМП в подвижной НАП, основанный на мониторинге смещения навигационного решения* [22]. Способ основывается на том, что постановщики ИМП, как правило, используют одну передающую антенну, в то время как истинные НС принимаются с различных направлений. За счет этого, смещение навигационного решения приобретает зависимость от траектории движения НАП относительно неподвижного источника ИМП. Анализ динамики смещения позволяет выявить факт наличия ложного НС, создаваемого неподвижным источником. Однако для реализации данного способа необходимо оценить начальное состояние смещения навигационного решения, которое требует статистического анализа до начала движения.

11 *Способ обнаружения ИМП, основанный на статистическом анализе выходных данных коррелятора*. Вероятностные распределения амплитуды выходного напряжения коррелятора при приеме только истинного НС без воздействия ИМП и при воздействии ИМП могут быть существенно различными за счет взаимодействия истинного НС и ИМП в корреляторе, что может послужить маркером для обнаружения факта присутствия ИМП. Наличие ИМП может быть обнаружено, если полученные по результатам анализа вероятностные распределения амплитуды (вида  $\chi^2$  [23]) на выходах коррелятора, значительно отличаются от аналогичных распределений для случая действия только истинного НС. Данный способ реализуем, если доступны другие НС, находящиеся в слежении и неподверженные взаимодействию с ИМП [24].

12 *Способ ослабления ИМП, основанный на восстановлении остаточного НС* [13]. Способ ослабления ИМП и обнаружения остаточного НС заключается в том, чтобы из принимаемой смеси истинного НС, ИМП и шума, записанной в буферной памяти, удалить составляющую ИМП, отслеживаемую в дополнительном канале слежения, а затем попытаться обнаружить истинный НС в ограниченной области по задержке и частоте [22,23]. При большом отношении ИМП/НС по мощности обнаружение полезной составляющей НС проблематично. Отмечается, что реализация данного способа значительно увеличивает сложность НАП, поскольку требуются

дополнительные каналы слежения за ложными НС.

### 13 Способ ослабления ИМП, основанный на контроле невязок измерений

Способ использует избыточность навигационной информации, получаемой от НСЗ. Решение навигационной задачи выполняется с использованием метода наименьших квадратов [1]:

$$\sum_{i=1}^N \{\tilde{p}_i(x, y, z, \Delta_\tau) - p_i\}^2 \xrightarrow{x, y, z, \Delta_\tau} \min,$$

где величины  $\tilde{p}_i(x, y, z, \Delta_\tau) - p_i$  называют невязками измерений. Если какая-либо из найденных псевдодальностей содержит аномальную ошибку, невязки измерений резко увеличиваются. При этом, если

$$\tilde{p}_i(x, y, z, \Delta_\tau) - p_i \geq \Delta p_{max},$$

где  $\Delta p_{max}$  - некоторое пороговое значение, то реализуется обнаружение искаженного измерения с заданной вероятностью ложной тревоги. При исключении искажённых измерений невязки резко уменьшаются. Порог обнаружения для заданной вероятности ложной тревоги может быть определен с учетом нормализации анализируемой статистики невязок. Отмечается [25], что надежность обнаружения и исключения невязок измерений (по псевдодальности или доплеровской частоте) зависит от количества полученных измерений по НС от разных НСЗ. При действии ИМП с небольшими рассогласованиями по псевдодальности и доплеровской частоте возможны ошибочные решения, когда истинные измерения от навигационных спутников будут приняты за ложные.

## 1.6 Выводы по разделу 1

1. Преднамеренные радиопомехи представляют серьезную опасность для функционирования НАП СРНС, поэтому проводятся интенсивные исследования, целью которых является повышение помехозащищенности НАП. Разработанные способы защиты от преднамеренных помех позволяют обеспечить функционирование НАП при отношении помеха/сигнал на входе средства помехозащиты до 90 дБ и более, а также исключить возможность искажения НВО при решении навигационной задачи в НАП.

2. Известные способы защиты от маскирующих помех основаны на пространственно-временной, частотно-временной и корреляционной обработке навигационных сигналов. Общим для основных способов защиты от маскирующих помех является то, что они требуют затрат времени для оценки параметров помех. Эффективность этих способов ограничивается количеством разнесенных по пространству и частоте источников помех.

3. Способы защиты от имитирующих помех, в основном, ориентированы на защиту



от одиночных имитаторов, излучающих одновременно несколько ложных НС с отличными от истинных НС пространственно-энергетическими характеристиками. Недостатком этих способов является необходимость получения НВО на основе НС, неподверженных воздействию ИМП.

4. Для повышения помехозащищенности в НАП может использоваться любой (или одновременно несколько) из рассмотренных способов с учетом необходимых программных и аппаратных доработок на различных уровнях функционирования НАП.

## **2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОТИВОНАВИГАЦИОННОГО ПОЛЯ РАДИОПОМЕХ**

Противодействие НАП СРНС может реализовываться в интересах решения различных задач, к которым относятся следующие.

1) Противодействие опасным объектам, оснащенным НАП СРНС, путем радиоподавления НАП. Такими объектами могут быть, например, БЛА, оснащенные средствами радиотехнической разведки, радиоэлектронной борьбы и поражения, террористические и разведывательно-диверсионные группы и другие. Существенно, что при решении таких задач должна быть известна пространственная зона, в пределах которой расположены объекты радиоподавления.

2) Защита объектов своей стороны от оружия, наводящегося на эти объекты по информации, получаемой от НАП СРНС, путем радиоподавления НАП (объектовая защита). Защищаемыми объектами могут быть промышленные предприятия, электростанции, мосты, аэродромы и другие. Исходными данными при организации объектовой защиты являются координаты защищаемых объектов, возможные типы средств поражения, а также атакоопасные направления.

3) Защита территории (региона, нескольких регионов, страны) от любых средств вооруженной борьбы, имеющих в своем составе НАП СРНС, путем радиоподавления НАП. Эта задача по своему содержанию всеобъемлющая, ее решение автоматически означает также решение частных задач 1 и 2.

Материалы раздела 2 опубликованы в работах автора [48,49,50,51,52]

### **2.1 Требования к характеристикам противонавигационного поля радиопомех**

Анализ содержания задачи и целей создания ПНПР позволяет сформулировать основные требования к характеристикам ПНПР различных видов. Рассмотрим их по отдельности.

*Противонавигационное поле противодействия опасному объекту.* При создании ПНПР этого вида задано пространственное положение опасного объекта в виде зоны, в пределах которой он гарантированно находится. Создаваемое ПНПР должно перекрывать эту зону (рисунок 2.1).

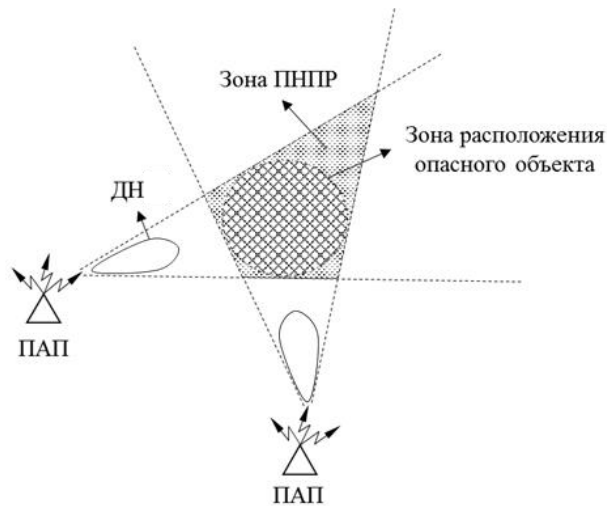


Рисунок 2.1 - Противонавигационное поле противодействия опасному объекту: ПАП - постановщик активных помех; ДН - диаграмма направленности антенны ПАП

Зона, в пределах которой создается ПНПР, определяется шириной ДН и пространственным положением ПАП. Количество ПАП, создающих ПНПР в требуемой зоне, может быть различным. Основное требование к ПНПР – срыв слежения за параметрами НС и предотвращение захвата НС спутников на слежение в пределах требуемой зоны. Средствами создания ПНПР могут быть постановщики шумовых помех (ШП). Ширина спектра ШП определяется шириной спектра НС (полосой пропускания приемника НАП).

*Противонавигационное поле защиты объекта.* Если направления возможных атак на защищаемый объект (ЗО) (атакоопасные сектора) известны, то конфигурация ПНПР, создаваемого для защиты ЗО, может иметь вид, представленный на рисунке 2.2.

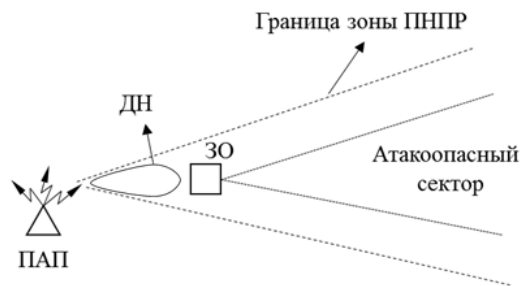


Рисунок 2.2 - Конфигурация ПНПР ЗО при известном атакоопасном секторе

Если атакоопасные сектора не определены, то конфигурация ПНПР может иметь вид, представленный на рисунке 2.3.

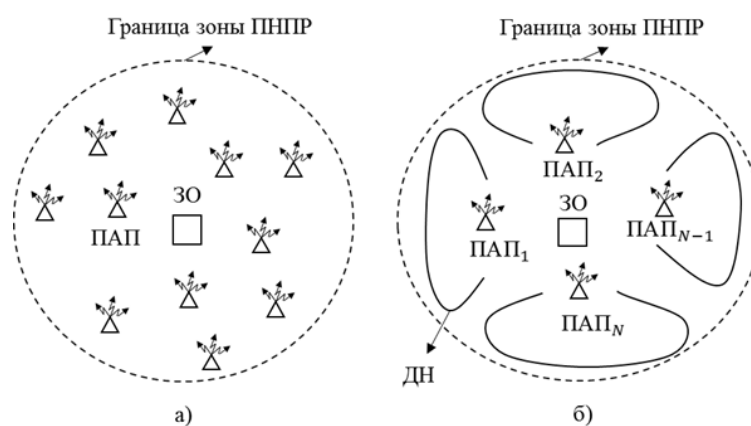


Рисунок 2.3 - Конфигурация ПНПР ЗО при неизвестном атакоопасном секторе: а - применение ПАП с ненаправленной ДН; б - применение ПАП с направленной ДН.

Во всех случаях основным требованием к ПНПР является срыв слежения за задержкой огибающей дальномерного кода и несущей частотой НС НСЗ соответствующими следящими контурами, имеющимися в составе подавляемой НАП. Срыв поиска НС по задержке и частоте при решении рассматриваемой задачи представляет интерес, если в НАП произошел срыв слежения по задержке и частоте. Как и при решении предыдущей задачи, средством создания ПНПР могут быть постановщики ШП.

В случае, соответствующем рисунку 2.2, требуемая ширина ДН постановщика ШП определяется шириной атакоопасного сектора. Требуемая мощность постановщика ШП зависит от положения дальней границы зоны ПНПР, а также от дальности прямой видимости носителя подавляемой НАП из точки расположения постановщика ШП.

На рисунке 2.3 (а) показаны ПАП с ненаправленными антеннами в горизонтальной плоскости. Вариант конфигурации ДН – «купол» с охватом  $360^\circ$  в горизонтальной и  $180^\circ$  (верхняя полусфера) в вертикальной плоскости. Расстановка ПАП на местности, высота подъема ПАП над земной поверхностью, а также мощность ПАП должны обеспечивать «сплошное покрытие» требуемой зоны ПНПР с учетом реального рельефа местности. Средством создания ПНПР, как и в предыдущем случае, могут быть постановщики ШП. В этом случае их требуемая мощность определяется такими факторами, как наибольшее из расстояний между рассматриваемым постановщиком ШП и соседними с ним постановщиками ШП, форма ДН, наибольшая возможная высота полета носителей подавляемой НАП, а также наличие в составе подавляемой НАП средств помехозащиты защиты от ШП.

На рисунке 2.3 (б) показаны ПАП с направленными антеннами в горизонтальной плоскости. Каждый ПАП «обслуживает» выделенный ему угловой сектор, размеры которого определяется ДН. Как и в предыдущих случаях, ПНПР может быть создано с помощью постановщиков

ШП.

*Противонавигационное поле защиты территории.* Задачу защиты территории можно считать решенной, если обеспечивается подавление НАП СРНС в любой точке защищаемой территории на заданных высотах. Как указано выше, основным требованием к ПНПР защиты территории может быть предотвращение поиска и захвата НС на слежение и срыв слежения за параметрами НС в любой точке ПНПР.

Реализация указанных требований возможна на базе рассмотренного выше подхода к построению ПНПР объектовой защиты, иллюстрируемого рисунком 2.3. При этом потребуется разместить постановщики ШП на всей защищаемой территории. Принципы расстановки постановщиков ШП на местности, требования к их мощности и форме ДНА не меняются. Однако энергетические и аппаратурные затраты, требуемые для реализации такого подхода, могут оказаться неприемлемо большими.

Необходимость снижения затрат требует использования при создании ПНПР защиты территории иных принципов и средств. В частности, перспективно использование в составе ПНПР постановщиков дезинформирующих или искажающих помех. Создание таких помех, как правило, не требует больших энергетических затрат. Однако, как указывалось выше, реализация помех искажающего и имитирующего действия проблематична. Что касается ИМП, то они не способны реализовать требование срыва слежения за параметрами НС следящими контурами подавляемой НАП.

Подход, позволяющий удовлетворить требования к ПНПР защиты территории, может быть основан на совместном использовании помех маскирующего и имитирующего действия. Вариант реализации такого подхода поясняется рисунком 2.4.

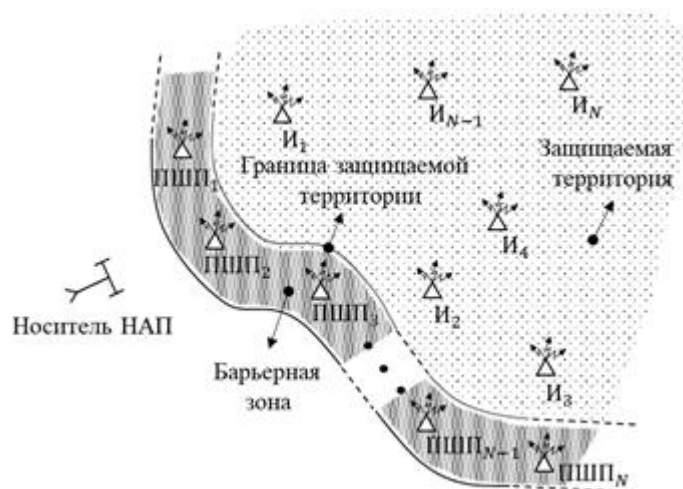


Рисунок 2.4 - Конфигурация ПНПР защиты территории:

ПШП - постановщик ШП; И - постановщик ИМП

Вдоль границы защищаемой территории с ее наружной стороны создается барьерная зона. В пределах барьерной зоны размещаются ПШП. На защищаемой территории размещаются постановщики ИМП. Ширина барьерной зоны и мощности ПШП выбираются таким образом, что за время, в течение которого носитель НАП СРНС преодолевает барьерную зону, гарантированно реализуется срыв слежения за задержкой и частотой НС следящими контурами НАП. Постановщики ИМП создают ложные НС. Расстановка постановщиков ИМП на местности и параметры излучаемых ими ложных НС выбираются таким образом, чтобы попытки допояска или поиска НС после преодоления барьерной зоны, где произошел срыв слежения за параметрами НС, гарантированно привели к захвату на слежение ложных НС.

Разработка методики обоснования параметров постановщиков ИМП представляет самостоятельный интерес. Очевидно, что при обосновании необходимо учитывать имеющиеся в составе подавляемой НАП средства идентификации ложных НС. Как указано выше, вариантами постановщиков ИМП могут быть ретрансляторы, специальные генераторы и пассивные отражатели на базе уголков, линз и короткозамкнутых антенн.

Основные энергетические затраты при использовании подхода, иллюстрируемого рисунком 2.4, идут на создание ПНПР в барьерной зоне, где размещаются ПШП. Величина этих затрат зависит от протяженности границы территории (протяженности атакоопасных участков границы). Что касается энергозатрат на создание ложных НС в глубине защищаемой территории, то они, как правило, невелики и дополнительно уменьшаются при использовании в качестве постановщиков ИМП пассивных отражателей НС.

В настоящее время наиболее простым и надежным способом создания ПНПР в интересах объективно-территориальной защиты является использование в составе ПНПР постановщиков помех маскирующего действия, однако современные средств помехозащиты, применяемые в НАП, значительно увеличивают требования к энергетике ПНПР.

Для учета требуемых энергетических затрат на создание ПНПР и оценки его эффективности в интересах объективно-территориальной защиты целесообразно проанализировать критерии нарушения функционирования НАП при нахождении ее внутри созданного ПНПР, а также наиболее перспективные средства помехозащиты, чтобы сформулировать требования к конфигурации и характеристикам ПНПР для успешного решения поставленных задач радиоподавления НАП.

## 2.2 Условие подавления и показатели качества подавления навигационной аппаратуры потребителей в различных режимах

В настоящее время в качестве основного средства создания ПНПР рассматриваются активные маскирующие радиопомехи (АП), в частности шумовые помехи [36,37]. Помеха типа «Шум в полосе частот НС» маскирует сигналы НСЗ в приемных каналах НАП. На этапе обнаружения НСЗ шумовая маскировка затрудняет обнаружение НС спутников. На этапе сопровождения НСЗ действие АП приводит к возрастанию вероятности пропуска НС в процессе сопровождения, увеличению ошибок слежения за параметрами НС (фазой, частотой и временной задержкой), а также, возможно, к срыву слежения за этими параметрами и срыву сопровождения НСЗ.

Условие радиоподавления НАП активной маскирующей помехой имеет общий вид:

$$\frac{P_{п. вх}}{P_{НС вх}} = \frac{P_{с.ш. вх} + P_{АП вх}}{P_{НС вх}} \geq K_{под} (ПК_{под}), \quad (2.1)$$

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 собственного шума 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.

Одной из основных энергетических характеристик, определяющих эффективность работы НАП в режиме поиска (допоиска) и слежения, является отношение сигнал/шум на выходе коррелятора. Если на входе приёмника НАП действует шум с равномерной спектральной плотностью мощности (СПМ), то для выходного отношения сигнал/шум (ОСШ) по мощности на выходе коррелятора справедливо

$$q_{вых}^2 = \frac{A_{НС вых}^2}{2 \sigma_{ш. вых}^2} = \frac{2E_{НС вх}}{G_{ш. вх}} K_{пот}^{-1}, \quad (2.2)$$

где  $A_{НС вых}$  и  $\sigma_{ш. вых}$  – амплитуда НС и среднеквадратическое значение шума на выходе коррелятора;

$E_{НС вх}$  и  $G_{ш. вх}$  – энергия накапливаемого коррелятором фрагмента НС и «односторонняя» СПМ шума на входе коррелятора;

$K_{пот} \geq 1$  – коэффициент, учитывающий потери в величине  $q_{вых}^2$  за счет отличия обработки НС от оптимальной.

Для входящих в (2.2) величин справедливо:

$$E_{НС вх} = P_{НС вх} \tau_{э} N_{э}, \quad (2.3)$$

где  $\tau_э$  – длительность элементарного символа («чипа») кода НС;

$N_э$  – количество накапливаемых в корреляторе элементарных символов кода (иначе говоря, длина обрабатываемого коррелятором фрагмента кода НС).

Подставляя (2.3) в (2.2) и умножая числитель и знаменатель на  $\Delta f_{НС}$  (ширину спектра НС), получим

$$q_{\text{ВЫХ}}^2 = \frac{2P_{НС \text{ ВХ}} \tau_э N_э \Delta f_{НС}}{K_{\text{ПОТ}} G_{\text{Ш. ВХ}} \Delta f_{НС}} = \frac{2B_{НС} P_{НС \text{ ВХ}}}{K_{\text{ПОТ}} P_{\text{Ш. ВХ}}}. \quad (2.4)$$

Здесь учтено, что произведение  $\tau_э N_э \Delta f_{НС} = B_{НС}$  – база обрабатываемого в корреляторе фрагмента НС и поскольку полоса пропускания приемника НАП  $\Delta f_{\text{ПР}}$  приближенно равна  $\Delta f_{НС}$  (приемник согласован по полосе частот с НС), то произведение  $G_{\text{Ш. ВХ}} \Delta f_{НС} = G_{\text{Ш. ВХ}} \Delta f_{\text{ПР}} = P_{\text{Ш. ВХ}}$  определяет мощность  $P_{\text{Ш. ВХ}}$  суммарного шума на входе приемника.

С учетом (2.4), выражение (2.1) для определения коэффициента подавления может быть представлено в виде:

$$K_{\text{ПОД}}(\text{ПК}_{\text{ПОД}}) = \frac{2B_{НС}}{q_{\text{ВЫХ}}^2(\text{ПК}_{\text{ПОД}}) K_{\text{ПОТ}} K_{\text{КАЧ}}}, \quad (2.5)$$

где  $q_{\text{ВЫХ}}^2(\text{ПК}_{\text{ПОД}})$  – требуемое значение  $q_{\text{ВЫХ}}^2$  при заданном  $\text{ПК}_{\text{ПОД}}$ ;

$K_{\text{КАЧ}}$  – коэффициент качества помехи, учитывающий отличие АП от помехи с равномерной СПМ, действующей в полосе пропускания приемника.

База накапливаемого фрагмента НС определяется с учетом приближения  $\Delta f_{НС} \approx 2/\tau_э$  (по первым нулям основного спектрального пика) на основе соотношения

$$B_{НС} = \tau_э N_э \Delta f_{НС} = \tau_э N_э \frac{2}{\tau_э} = 2 N_э.$$

Для сигналов с модуляцией ВОС(m,n) полоса частот определяется между основными спектральными пиками модулирующей последовательности [32].

В таблице 2.1 приведены значения базы НС для СРНС GPS, рассмотренной в первом разделе.

Таблица 2.1 - База НС СРНС GPS

Сигнал	C/A	P(Y)	L2CM	L2C	L2M	L5	M	L1C <sub>d</sub>	L1C <sub>p</sub>
База	2046	20460	2046	1023	1023	20460	30690	4096	4096 / 14322

Коэффициент подавления является важнейшей характеристикой помехоустойчивости НАП. Его величина показывает во сколько раз мощность АП на входе НАП должна превосходить мощность НС рабочего НСЗ, чтобы НАП можно было считать подавленной с требуемым уровнем



$PK_{\text{под}}$ .

Далее рассмотрим показатели качества подавления в различных режимах функционирования НАП при воздействии АП.

### **2.2.1 Показатели качества подавления в различных режимах функционирования навигационной аппаратуры потребителей**

Показатель качества подавления ( $PK_{\text{под}}$ ) это параметр, характеризующий функциональную связь некоторого критического ОСШ на выходе коррелятора НАП с различными вероятностными и временными характеристиками, при которых приемник НАП не способен выполнять возложенные на него функции на этапе первичной обработки НС. Показатели качества подавления на этапе вторичной обработки НС в НАП в данной работе не рассматриваются.

Показатели качества подавления различны применительно к разным подавляемым функциям НАП, выполняемым на этапе первичной обработки НС. Подавляемыми функциями НАП на этапе первичной обработки НС могут быть:

- обнаружение НС в рассматриваемом элементе разрешения по временной задержке и частоте;
- обнаружение НСЗ (захват НС);
- сопровождение НСЗ, включающее в себя:
  - 1) подтверждение присутствия НС в процессе слежения за параметрами НС (фазой, частотой и задержкой огибающей);
  - 2) слежение за параметрами НС.

Определим показатели качества подавления применительно к различным режимам функционирования НАП (подавляемым функциям) на этапе первичной обработки НС.

#### **2.2.1.1 Показатель качества подавления функции обнаружения НС в элементе разрешения**

Обнаружение НС в анализируемом элементе разрешения реализуется путем сравнения модуля выходной величины коррелятора  $U_{\text{вых. кор}}$  в момент окончания обрабатываемого фрагмента НС с порогом обнаружения  $U_{\text{пор}}$ . Уровень  $U_{\text{пор}}$  формируется на основе анализа значений  $U_{\text{вых. кор}}$ , полученных в совокупности элементов разрешения (в «окне»), окружающих элемент, анализируемый в текущий момент.

В случае подавления обнаружителя НС в качестве  $PK_{\text{под}}$  примем вероятность правильного обнаружения НС в рассматриваемом элементе разрешения  $D$  при фиксированной вероятности ложной тревоги  $F$ . Будем считать, что значения  $D$  и  $F$  одинаковы для всех элементов разрешения

по частоте и временной задержке. Такое предположение упрощает дальнейшее рассмотрение. С учетом принятого показателя качества подавления  $PK_{\text{под}}$ , искомое соотношение для коэффициента подавления обнаружителя НС из (2.5) может быть представлено в виде:

$$K_{\text{под}}^{(\text{обн.НС})}(PK_{\text{под}}) = K_{\text{под}}^{(\text{обн.НС})}(D, F) = \frac{2B_{\text{НС}}}{q_{\text{вых},(D,F)}^2 K_{\text{пот}} K_{\text{кач}}}, \quad (2.6)$$

где  $q_{\text{вых},(D,F)}^2$  – величина  $q_{\text{вых}}^2$ , при которой в анализируемом элементе разрешения реализуются требуемые вероятности  $D$ ,  $F$ ;

$K_{\text{кач}}$  – коэффициент качества помехи, учитывающий отличие используемой АП от помехи с равномерной СПМ.

Значение  $q_{\text{вых}}^2$  определяется по характеристикам обнаружения (ХО)  $D = f_{\text{ХО}}(q_{\text{вых}}^2, F)$  применительно к используемой модели НС. Вопросы определения ХО для различных моделей НС рассмотрены в [53], например, характеристика обнаружения для модели НС со случайной начальной фазой и амплитудой определяется

$$D = F^{1 + \frac{1}{2} \frac{q_{\text{вых}}^2}{F}}.$$

В режиме поиска НС, когда необходимо просмотреть достаточно большое количество ячеек по задержке и частоте, требования к вероятности ложной тревоги возрастают вплоть до значений  $F = 10^{-5} \dots 10^{-6}$ , что приводит к увеличению порога обнаружения и необходимости увеличения требуемого значения ОСШ. Однако, когда в результате кратковременного пропадания НС (срыв слежения) в течении некоторого времени, в течении которого НАП способна уменьшить область поиска (по задержке и частоте) при реализации процедуры допоиска за счет, например, многоотводной линии задержки в корреляторе, требования к вероятности ложной тревоги могут существенно снижены до  $F = 10^{-1} \dots 10^{-2}$ , что приведет к снижению порога обнаружения, а, следовательно, к более высокой чувствительности при реализации допоиска. Например, если ошибка местоположения и времени не превышает половины длительности символа дальномерного кода (линейного участка детектора задержки), то возможен мгновенный захват НС при потере сигнала, так как среднеквадратическая ошибка слежения находится на линейном участке дискриминационной характеристики (ДХ) [1,32].

На рисунке 2.5 приведены зависимости коэффициента подавления функции обнаружения НС при различных параметрах ( $D$  и  $F$ ) показателя качества подавления для типовых сигналов СРНС GPS. База сигналов СРНС GPS определяется в соответствии с таблицей 2.1. В разделе 2 для расчетов используется модель НС со случайной начальной фазой и амплитудой,  $K_{\text{кач}} = 1$  (помеха с равномерной СПМ),  $K_{\text{пот}} = 1$ .

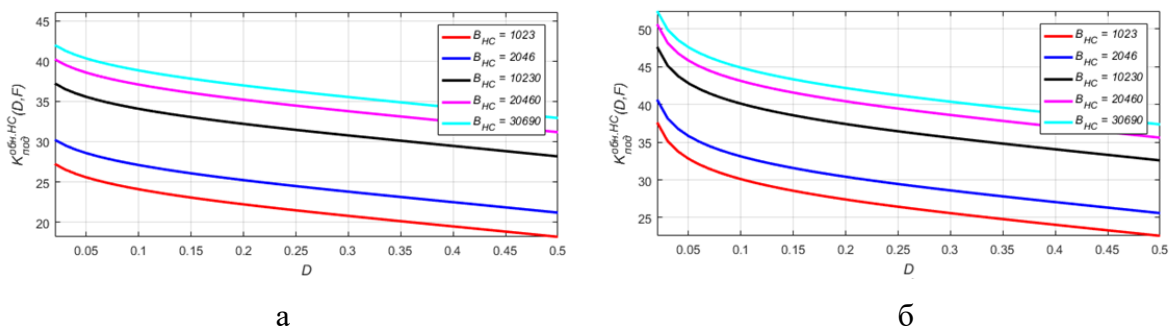


Рисунок 2.5 - Зависимость  $K_{\text{под}}^{(\text{обн.НС})}$  от  $D$  при различных значения  $N_{\text{НС}}$  :

а -  $F = 10^{-5}$ , б -  $F = 10^{-2}$

### 2.2.1.2 Показатели качества подавления функции обнаружения НСЗ. Критерий обнаружения НС « $m$ раз подряд». Критерий обнаружения НС « $m$ из $n$ ».

#### Критерий обнаружения НС « $m$ раз подряд»

Факт обнаружения НСЗ устанавливается по данным от обнаружителя НС. В качестве критерия обнаружения НСЗ будем рассматривать «Обнаружение НС  $m$  раз подряд». Такой критерий означает, что НАП принимает решение об обнаружении НСЗ (с последующим переходом к его сопровождению), если обнаружение НС этого НСЗ имело место каждый раз при обработке в корреляторе последовательности из  $m$  следующих друг за другом фрагментов НС длительностью  $\tau_{\text{фр}} = \tau_{\text{э}} N_{\text{э}}$ . После обнаружения НСЗ и принятия решения о переходе к его сопровождению обнаружитель НС используется для подтверждения присутствия НС, а следящие контура, находящиеся в составе НАП, переходят к слежению за параметрами НС (фазой, частотой, задержкой кода НС) этого НСЗ.

В частном случае, когда при обработке каждого фрагмента НС вероятность правильного обнаружения  $D = 1$ , критерий «Обнаружение НС  $m$  раз подряд» реализуется за время  $m \tau_{\text{э}} N_{\text{э}}$  после начала процедуры обнаружения. Если же  $D < 1$ , то для решения задачи обнаружения НСЗ требуется большее время, причем с уменьшением  $D$  это время увеличивается.

Получим соотношения для расчета вероятности обнаружения НСЗ как функции времени, потраченного на обнаружение, а также для расчета времени, требуемого для решения задачи обнаружения НСЗ. Пусть на текущий момент времени  $t$ , отсчитываемый от момента  $t_0$  начала процедуры обнаружения НСЗ, величина  $\tau = t - t_0 > \tau_{\text{фр}}$ . Тогда количество обработанных в корреляторе НАП фрагментов НС на момент  $t$  (за время  $\tau$ )

$$N_{\text{фр},\tau} = \left\lfloor \frac{\tau}{\tau_{\text{фр}}} \right\rfloor, \quad (2.7)$$

где символ  $\lfloor \dots \rfloor$  обозначает целую часть числа.

Возможное количество опытов по проверке критерия «Обнаружение НС  $m$  раз подряд»

(испытаний) за время  $\tau$  очевидно равно  $N_{\text{фр.}\tau} - m + 1$ . Вероятность выполнения критерия «Обнаружение НС  $m$  раз подряд» при однократном испытании одинакова для всех испытаний и равна  $D^m$ . Событие «Обнаружение НСЗ» реализуется, если на текущий момент  $t$  имеет место положительный исход хотя бы одного испытания рассматриваемого критерия. При независимых испытаниях вероятность такого события можно вычислить на основе биномиального закона распределения вероятностей. Основываясь на [54], для вероятности  $P_{\text{обн.НСЗ},\tau}$  обнаружения НСЗ за время  $\tau$  получим соотношение

$$P_{\text{обн.НСЗ},\tau} = 1 - (1 - D^m)^{(N_{\text{фр.}\tau} - m + 1)}. \quad (2.8)$$

Определим также время  $\tau_{\text{обн.НСЗ},P^*}$ , требуемое для обнаружения НСЗ с заданной вероятностью  $P^*$ . Для этого следует найти число испытаний рассматриваемого критерия, которое нужно провести, чтобы этот критерий выполнялся хотя бы один раз с вероятностью не менее  $P^*$ . С учетом того, что возможное на момент  $t$  количество проверок критерия составляет  $N_{\text{фр.}\tau} - m + 1$ , необходимое для обеспечения заданной вероятности  $P^*$  количество фрагментов НС  $N_{\text{фр.треб.}P^*}$  определяется, согласно [54], соотношением

$$N_{\text{фр.треб.}P^*} \geq \frac{\ln(1 - P^*)}{\ln(1 - D^m)} + (m - 1). \quad (2.9)$$

Зная продолжительность  $\tau_{\text{фр}}$  фрагмента НС, обрабатываемого в корреляторе, на основе (2.8) найдем

$$\tau_{\text{обн.НСЗ},P^*} \geq \left[ \frac{\ln(1 - P^*)}{\ln(1 - D^m)} + (m - 1) \right] (\tau_{\text{фр}} N_{\text{э}}). \quad (2.10)$$

Для определения коэффициента подавления функции обнаружения НСЗ рассмотрим событие «Необнаружение НСЗ на текущий момент». Содержанием этого события является невыполнение критерия «Обнаружение НС  $m$  раз подряд» при всех располагаемых на момент  $t$  (за время  $\tau$ ) испытаниях. Это событие совместно с событием «Выполнение критерия «Обнаружение НС  $m$  раз подряд» хотя бы один раз за время  $\tau$ » образуют полную группу событий. Поэтому вероятность  $P_{\text{необн.НСЗ},\tau}$  необнаружения (предотвращения обнаружения) НСЗ за время  $\tau$  определяется разностью

$$P_{\text{необн.НСЗ},\tau} = 1 - P_{\text{обн.НСЗ},\tau} = (1 - D^m)^{(N_{\text{фр.}\tau} - m + 1)}. \quad (2.11)$$

Соотношение (2.11) позволяет также вычислить время  $\tau_{\text{необн.НСЗ},P^*}$ , в течение которого с вероятностью  $P^*$  обеспечивается предотвращение обнаружения НСЗ («Время необнаружения НСЗ с вероятностью  $P^*$ »). Это длительность отрезка времени, в течение которого вероятность  $P_{\text{необн.НСЗ},\tau}$  превышает  $P^*$ .

На рисунках 2.6, 2.7, 2.8 приведено графическое представление функции (2.11) в зависимости от  $\tau$  для типовых значений вероятности правильного обнаружения  $D$ , критериального параметра  $m$  и длительности накапливаемого фрагмента НС  $\tau_{\text{фр}}$ .

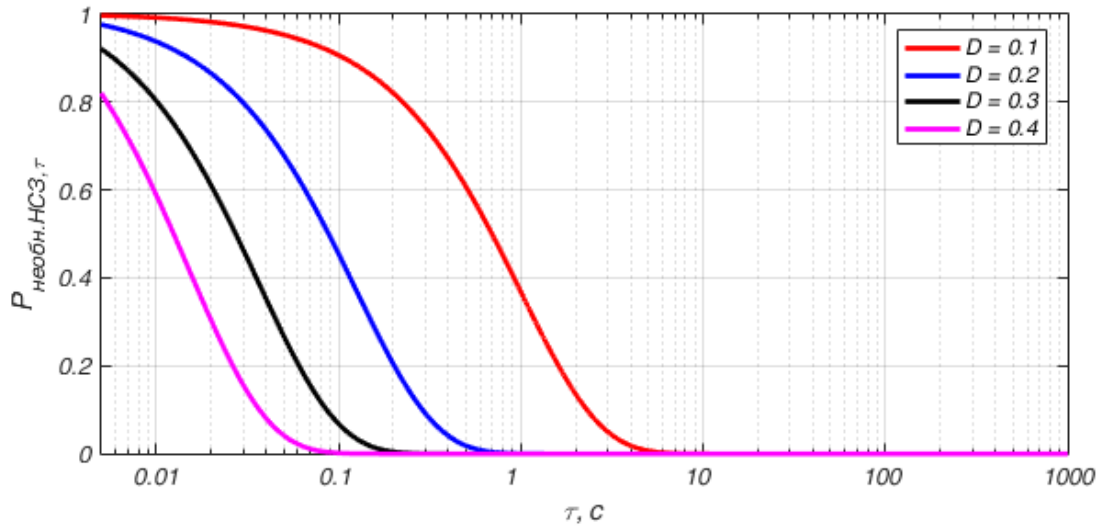


Рисунок 2.6 - Зависимость вероятности  $P_{\text{необн.НС3},\tau}$  от  $\tau$  при различных значениях  $D$  для  $m = 3$  и  $\tau_{\text{фр}} = 0.001$  с

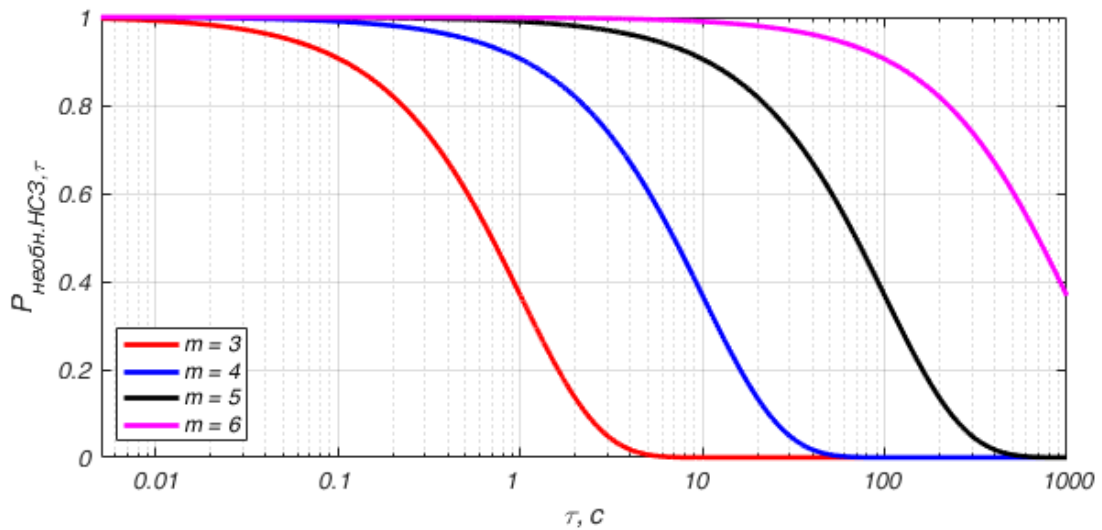


Рисунок 2.7 - Зависимость вероятности  $P_{\text{необн.НС3},\tau}$  от  $\tau$  при различных значениях критериального параметра  $m$  для  $D = 0.1$  и  $\tau_{\text{фр}} = 0.001$  с

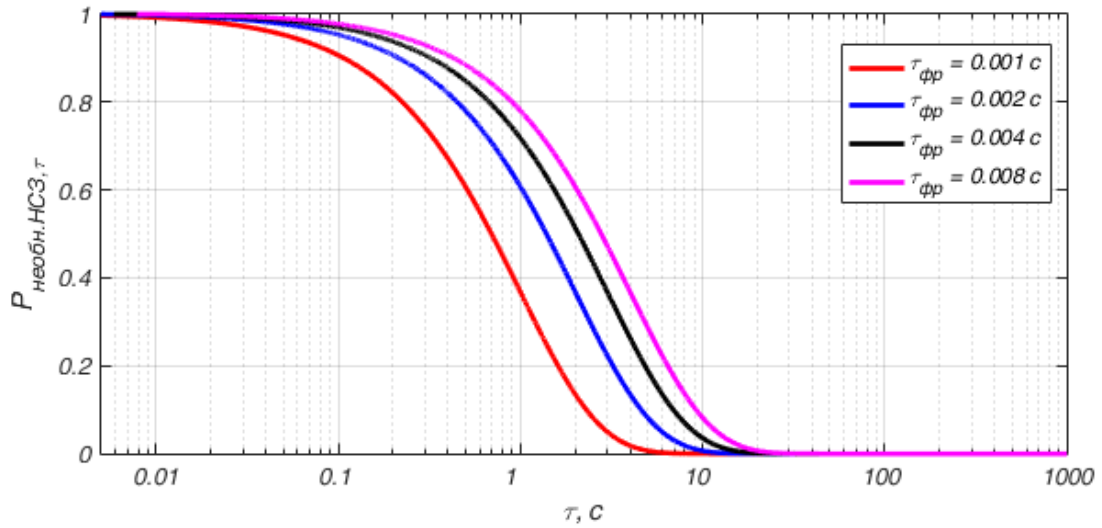


Рисунок 2.8 - Зависимость вероятности  $P_{\text{необн.НСЗ},\tau}$  от  $\tau$  при различных значениях  $\tau_{\text{фр}}$  для  $m = 3$  и  $D = 0.1$

На рисунках 2.9, 2.10, 2.11 приведено графическое представление функции (2.11) в зависимости от вероятности  $D$  для типовых значений времени необнаружения  $\tau$ , критериального параметра  $m$  и длительности накапливаемого фрагмента НС  $\tau_{\text{фр}}$ .

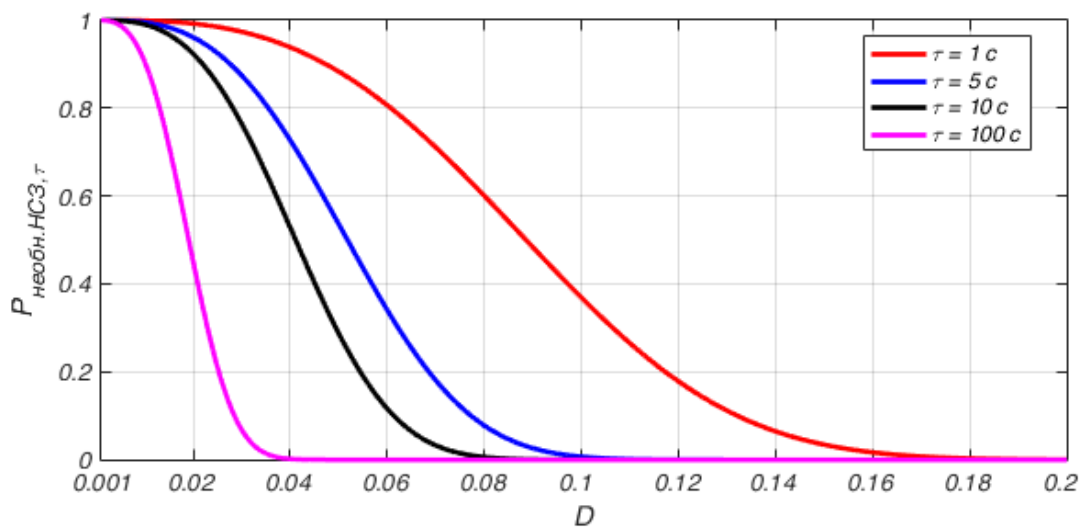


Рисунок 2.9 - Зависимость вероятности  $P_{\text{необн.НСЗ},\tau}$  от  $D$  при различных значениях  $\tau$  для  $m = 3$  и  $\tau_{\text{фр}} = 0.001$  с

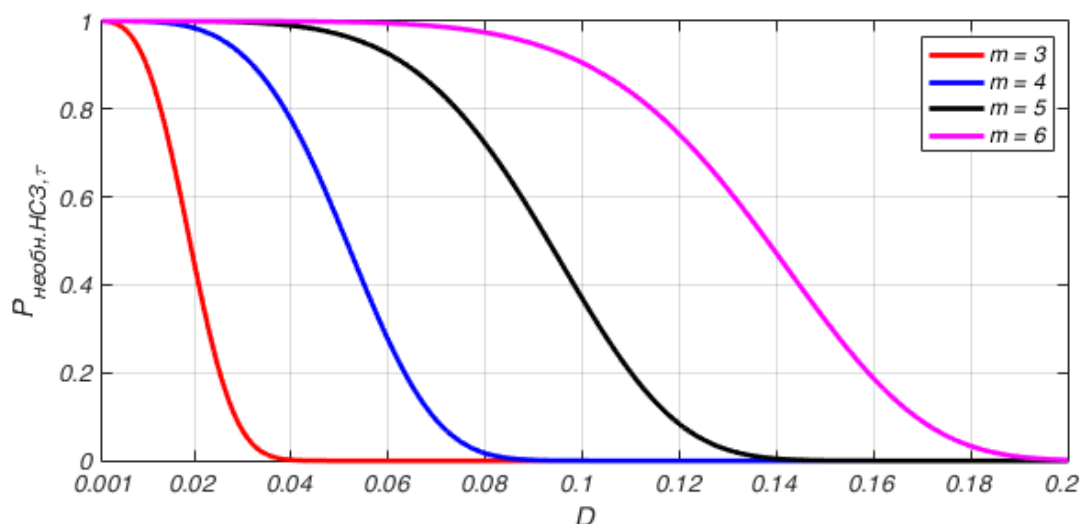


Рисунок 2.10 - Зависимость вероятности  $P_{\text{необн.НСЗ},\tau}$  от  $D$  при различных значениях  $m$  для  $\tau = 100$  с и  $\tau_{\text{фр}} = 0.001$  с

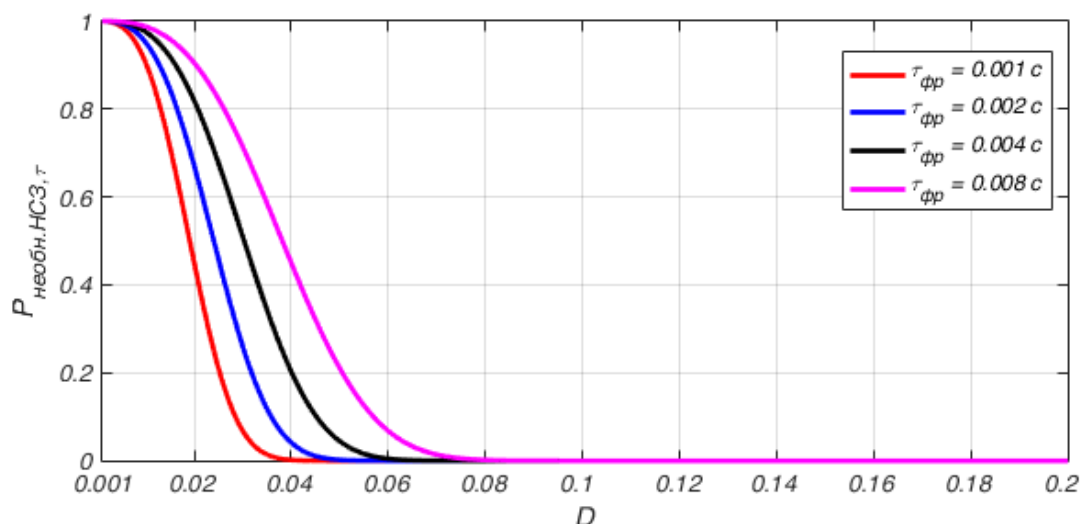


Рисунок 2.11 - Зависимость вероятности  $P_{\text{необн.НСЗ},\tau}$  от  $D$  при различных значениях  $\tau_{\text{фр}}$  для  $\tau = 100$  с и  $m = 3$

Повышение вероятности  $D$ , что может быть вызвано улучшением условий приема, приводит к снижению вероятности  $P_{\text{необн.НСЗ},\tau}$  при фиксированной времени обнаружения  $\tau$  и параметре  $m$ . Увеличение параметра  $m$  приводит к ужесточению требований к обнаружению НСЗ при фиксированном времени обнаружения  $\tau$  и вероятности  $D$ . Отсюда следует, что чем больше значение параметра  $m$ , тем выше вероятность  $P_{\text{необн.НСЗ},\tau}$  при фиксированном времени обнаружения  $\tau$  и вероятности  $D$ . При плохих условиях приема НС (низком ОСШ) в приемнике НАП увеличивается длительность накапливаемого фрагмента НС в корреляторе. Увеличение длительности накапливаемого фрагмента НС в корреляторе приводит к повышению вероятности

$P_{\text{необн.НСЗ},\tau}$  при заданном времени необнаружения  $\tau$ , критериальном параметре  $m$  и вероятности  $D$ , что обусловлено уменьшением количества доступных испытаний за время необнаружения  $\tau$ , при которых может выполняться критерий «Обнаружение НС  $m$  раз подряд». Увеличение времени необнаружения  $\tau$ , в течении которого необходимо предотвратить обнаружение НСЗ с заданной вероятностью  $P_{\text{необн.НСЗ},\tau}$ , приводит к уменьшению вероятности  $D$ , что обусловлено увеличением количества доступных испытаний в течении времени  $\tau$ .

Результаты расчетов, выполняемых на основе соотношения (2.11), позволяют определить значения вероятности  $D$  (при фиксированной вероятности  $F$ ), при которых обеспечиваются заданные уровни  $\text{ПК}_{\text{под}}$  НАП в виде вероятности  $P_{\text{необн.НСЗ},\tau}$  предотвращения обнаружения НСЗ в течение заданного времени  $\tau$  и времени  $\tau_{\text{необн.НСЗ},P^*}$  предотвращения обнаружения НСЗ с заданной вероятностью  $P^*$ . По полученным вероятностям  $D$  определяются значения выходного ОСШ  $q_{\text{вых}}^2$  коррелятора подавляемой НАП, которые должны быть обеспечены путем создания АП. После этого на основе (2.5) могут быть рассчитаны соответствующие коэффициенты подавления функции обнаружения НСЗ  $K_{\text{под}}^{(\text{обн.НСЗ})}(P_{\text{необн.НСЗ},\tau})$  и  $K_{\text{под}}^{(\text{обн.НСЗ})}(\tau_{\text{необн.НСЗ},P^*})$ .

В таблицах 2.2, 2.3 представлены расчётные значения коэффициентов подавления с вероятностным показателем качества подавления для следующих исходных данных:

- 1) вероятность необнаружения НСЗ  $P_{\text{необн.НСЗ},\tau} = 0.9$  за время необнаружения  $\tau = 100$  с;
- 2) вероятность  $F$  равна  $10^{-5}$  и  $10^{-2}$  соответственно;
- 3) база НС  $B_{\text{НС}}$  равна 2046, 20460 и 30690 соответственно;
- 4) время накопления фрагмента НС в корреляторе 1 и 4 мс соответственно;
- 5) параметр  $m = 6$ .

Таблица 2.2 - Расчетные значения  $K_{\text{под}}^{(\text{обн.НСЗ})}$  при  $\tau_{\text{фр}} = 1$  мс и критерии обнаружения НС «шесть подряд»

Вероятность $F$	$10^{-5}$			$10^{-2}$		
	База НС	2046	20460	30690	2046	20460
$K_{\text{под}}^{(\text{обн.НСЗ})}(P_{\text{необн.НСЗ},\tau)$ , дБ	27.1	37.1	38.8	33.1	43.1	44.8



Таблица 2.3 - Расчетные значения  $K_{\text{под}}^{(\text{обн.НСЗ})}$  при  $\tau_{\text{фр}} = 4$  мс и критерии обнаружения НС «шесть подряд»

Вероятность $F$	$10^{-5}$			$10^{-2}$		
База НС	2046	20460	30690	2046	20460	30690
$K_{\text{под}}^{(\text{обн.НСЗ})}(P_{\text{необн.НСЗ},\tau)$ , дБ	32.5	42.5	44.3	38.2	48.2	50

*Критерий обнаружения НС « $m$  из  $n$ »*

В современных образцах НАП широко используются специальные блоки поиска, которые позволяют организовать параллельный или близкий к нему последовательно-параллельный поиск сигнала. При параллельном поиске может быть использован критерий обнаружения вида « $m$  из  $n$ » с фиксированным временным циклом поиска. При этом критерии обнаружения НСЗ в элементе разрешения происходит после обработки  $n$  фрагментов НС, а решение об обнаружении НСЗ принимается, если порог обнаружения был превышен не менее  $m$  раз из  $n$ . Рассматриваемый далее критерий является универсальным по отношению к критерию «Обнаружение НС  $m$  подряд».

В качестве критерия обнаружения НСЗ будем рассматривать «Обнаружение НС  $m$  из  $n$ », где  $n$  фиксированное количество последовательных испытаний (однократных попыток обнаружения НС), а  $m$  минимально допустимое количество обнаружений НС за  $n$  испытаний. Такой критерий означает, что НАП принимает решение об обнаружении НСЗ (с последующим переходом к его сопровождению), если за один цикл поиска длительностью равный длительности  $n$  фрагментов НС  $\tau_{\text{цп}} = \tau_{\text{э}} N_{\text{э}} n = \tau_{\text{фр}} n$  имело место обнаружение НС этого НСЗ не менее  $m$  раз.

Получим выражение для расчета вероятности обнаружения НСЗ для критерия «Обнаружение НС  $m$  из  $n$ » как функции времени, потраченного на обнаружение, а также для расчета времени, требуемого для решения задачи обнаружения НСЗ. Пусть на текущий момент времени  $t$ , отсчитываемый от момента  $t_0$  начала процедуры обнаружения НСЗ, величина  $\tau = t - t_0 > \tau_{\text{цп}}$ .

Тогда количество завершенных циклов поиска  $N_{\text{цп},\tau}$  в обнаружителе на момент времени  $t$  (за время  $\tau$ )

$$N_{\text{цп},\tau} = \left\lfloor \frac{\tau}{\tau_{\text{цп}}} \right\rfloor, \quad (2.12)$$

где символ  $\lfloor \dots \rfloor$  [обозначает целую часть числа.

Событие «Обнаружение НСЗ» реализуется, если на текущий момент  $t$  имеет место положительный исход хотя бы одного испытания. При независимых испытаниях вероятность такого

события можно вычислить на основе биномиального закона распределения вероятностей. Основываясь на [54], для вероятности  $P_{\text{обн.НСЗ.}\tau}$  обнаружения НСЗ за время  $\tau$  получим соотношение

$$P_{\text{обн.НСЗ.}\tau} = 1 - (1 - D_{\text{цп}})^{N_{\text{цп.}\tau}}, \quad (2.13)$$

где  $D_{\text{цп}}$  – вероятность выполнения критерия «Обнаружение НС  $m$  из  $n$ ».

При независимых испытаниях однократных обнаружений НС вероятность  $D_{\text{цп}}$  можно вычислить также на основе биномиального закона распределения вероятностей. Основываясь на [54], вероятность  $D_{\text{цп}}$  за время однократной процедуры поиска  $\tau_{\text{цп}}$

$$D_{\text{цп}} = 1 - B(m - 1, n, D), \quad (2.14)$$

где  $B(m - 1, n, D)$  – интегральная плотность распределения вероятностей;

$D$  – вероятность однократного обнаружения НС.

Для определения коэффициента подавления функции обнаружения НСЗ рассмотрим событие «Необнаружение НСЗ на текущий момент». Содержанием этого события является невыполнение критерия «Обнаружение НС  $m$  из  $n$ » при всех располагаемых на момент  $t$  (за время  $\tau$ ) испытаниях. Используя теорему о сложении вероятностей несовместных событий, вероятность события «Необнаружение НСЗ на текущий момент» при критерии обнаружения «Обнаружение НС  $m$  из  $n$ »

$$P_{\text{необн.НСЗ.}\tau} = 1 - P_{\text{обн.НСЗ.}\tau} = B(m - 1, n, D)^{N_{\text{цп.}\tau}}. \quad (2.15)$$

На рисунках 2.12, 2.13, 2.14 приведено графическое представление функции (2.15) при фиксированных значениях  $\tau$  для различных критериев: «3 из 5», «4 из 5», «4 из 8», «5 из 8», «5 из 11» и «6 из 11».

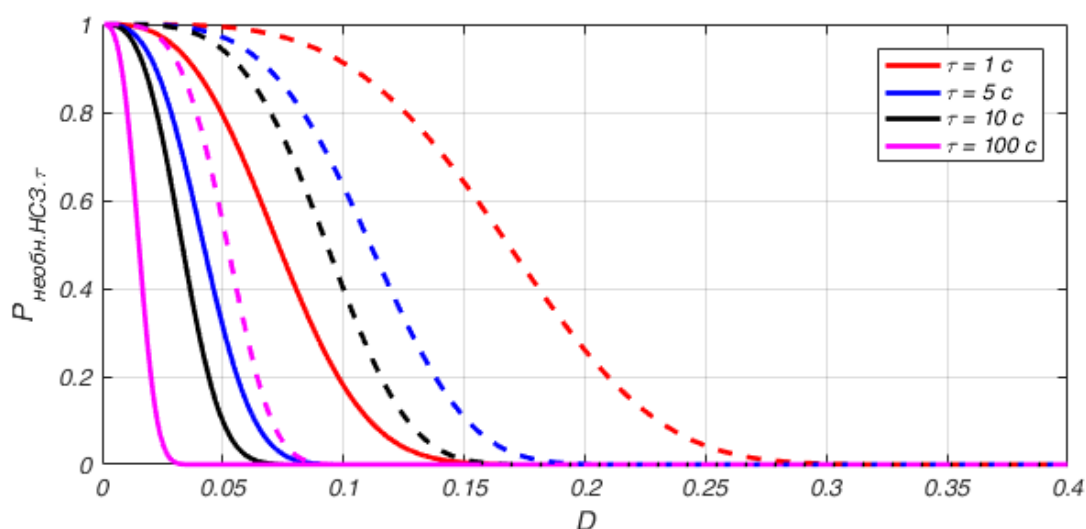


Рисунок 2.12 - Зависимость вероятности  $P_{\text{необн.НСЗ.}\tau}$  от  $D$  при различных значениях  $\tau$ :

сплошная линия - «3 из 5», штриховая - «4 из 5»

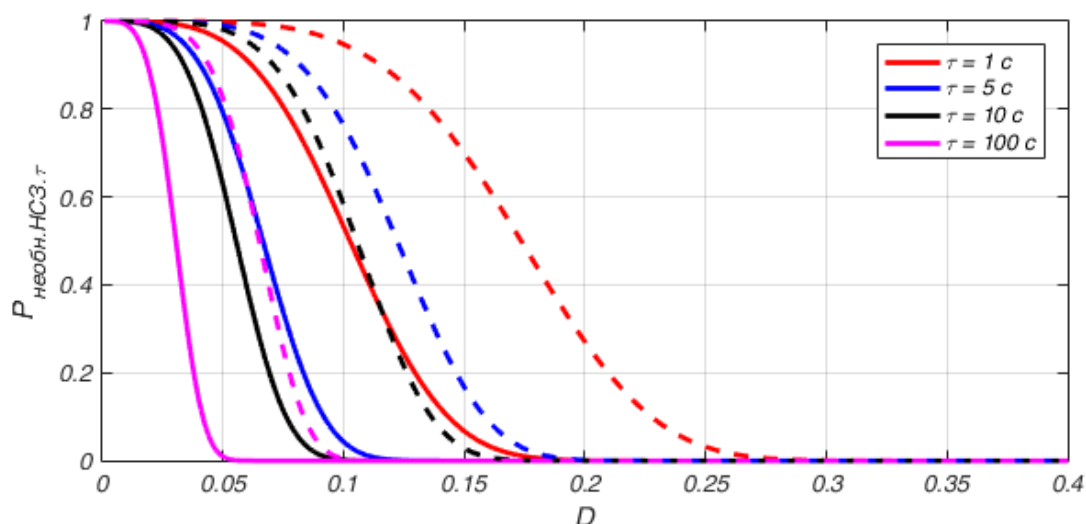


Рисунок 2.13 - Зависимость вероятности  $P_{\text{необн.НС3},\tau}$  от  $D$  при различных значениях  $\tau$ :  
сплошная линия - «4 из 8», штриховая - «5 из 8»

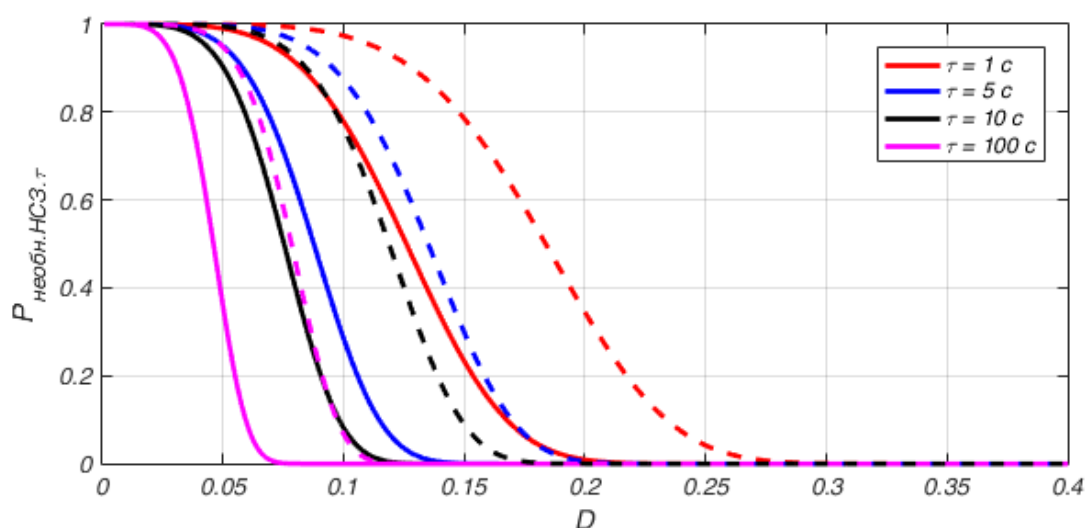


Рисунок 2.14 - Зависимость вероятности  $P_{\text{необн.НС3},\tau}$  от  $D$  при различных значениях  $\tau$ :  
сплошная линия – «5 из 11», штриховая «6 из 11»

Выводы относительно зависимости  $P_{\text{необн.НС3},\tau}$  от вероятности  $D$ , времени обнаружения  $\tau$  и критерия « $t$  из  $n$ » совпадают с выводами, сделанными относительно критерия «Обнаружения НС  $t$  раз подряд». Критерий «Обнаружение НС  $t$  из  $n$ » с фиксированным временем поиска более помехоустойчив по сравнению с критерием «Обнаружение НС  $t$  раз подряд».

Результаты расчетов, выполняемых на основе соотношения (2.15), позволяют определить значения вероятности  $D$  (при фиксированном значении вероятности  $F$ ) для обнаружителя НС, функционирующего в составе НАП, при которых обеспечиваются заданные уровни  $\text{ПК}_{\text{под}}$  НАП

в виде вероятности  $P_{\text{необн.НСЗ},\tau}$  предотвращения обнаружения НСЗ в течение заданного времени  $\tau$  и времени  $\tau_{\text{необн.НСЗ},P^*}$  предотвращения обнаружения НСЗ с заданной вероятностью  $P^*$ . По полученным значениям вероятности  $D$  определяются значения выходного ОСШ  $q_{\text{вых}}^2$  коррелятора подавляемой НАП, которые должны быть обеспечены путем создания АП. После этого на основе (2.5) могут быть рассчитаны соответствующие значения коэффициентов подавления функции обнаружения НСЗ  $K_{\text{под}}^{(\text{обн.НСЗ})}(P_{\text{необн.НСЗ},\tau})$  и  $K_{\text{под}}^{(\text{обн.НСЗ})}(\tau_{\text{необн.НСЗ},P^*})$ .

В таблицах 2.4, 2.5 представлены расчётные значения коэффициентов подавления с вероятностным показателем качества подавления для следующих исходных данных:

- 1) вероятность необнаружения НСЗ  $P_{\text{необн.НСЗ},\tau} = 0.9$  за время необнаружения  $\tau = 100$  с;
- 2) вероятность  $F$  равна  $10^{-5}$  и  $10^{-2}$  соответственно;
- 3) база НС  $B_{\text{НС}}$  равна 2046, 20460 и 30690 соответственно;
- 4) время накопления фрагмента НС в корреляторе 1 и 4 мс соответственно;
- 5) критерий «5 из 8».

Таблица 2.4 - Расчетные значения  $K_{\text{под}}^{(\text{обн.НСЗ})}$  при  $\tau_{\text{фр}} = 1$  мс и критерии обнаружения НС «5 из 8»

Вероятность $F$	$10^{-5}$			$10^{-2}$		
База НС	2046	20460	30690	2046	20460	30690
$K_{\text{под}}^{(\text{обн.НСЗ})}(P_{\text{необн.НСЗ},\tau)$ , дБ	28.8	38.8	40.6	36.3	46.3	48.1

Таблица 2.5 - Расчетные значения  $K_{\text{под}}^{(\text{обн.НСЗ})}$  при  $\tau_{\text{фр}} = 4$  мс и критерии обнаружения НС «5 из 8»

Вероятность $F$	$10^{-5}$			$10^{-2}$		
База НС	2046	20460	30690	2046	20460	30690
$K_{\text{под}}^{(\text{обн.НСЗ})}(P_{\text{необн.НСЗ},\tau)$ , дБ	34.3	44.3	46	41.2	51.2	52.9

### 2.2.1.3 Показатели качества подавления функции сопровождения НСЗ

Сопровождение НСЗ включает захват НС обнаруженного НСЗ, подтверждение присутствия НС в процессе сопровождения и слежение за параметрами НС сопровождаемого НСЗ. Будем исходить из предположения, что на текущий момент времени захват НС уже выполнен и подавляемая НАП в процессе сопровождения НСЗ реализует функции подтверждения присутствия НС и слежения за его параметрами. При таком предположении срыв сопровождения НСЗ

может иметь место в случае потери (пропуска) НС, либо при срыве слежения за параметрами НС сопровождаемого НСЗ.

*Показатель качества подавления в процессе сопровождения НСЗ в обнаружителе НС*

Факт потери НС сопровождаемого НСЗ устанавливается по информации от обнаружителя НС. Будем считать, что решение о потере НС сопровождаемого НСЗ выносится, если обнаружитель фиксирует отсутствие (пропуск) НС при обработке коррелятором  $n$  следующих друг за другом фрагментов НС, т.е. примем, что критерий потери НС - «Пропуск НС  $n$  раз подряд».

Получим соотношения для расчета вероятности потери НС сопровождаемого НСЗ как функции времени, потраченного на реализацию срыва сопровождения, а также для расчета времени, требуемого для решения задачи срыва сопровождения НСЗ при действии АП. Пусть на момент времени  $t$ , отсчитываемый от момента  $t_0$  начала процедуры срыва сопровождения НСЗ (начала действия АП), величина  $\tau = t - t_0 > \tau_{\text{фр}}$ . Тогда количество обработанных коррелятором НАП фрагментов НС  $N_{\text{фр},\tau}$  определяется согласно (2.7). Количество опытов по проверке критерия «Пропуск НС  $n$  раз подряд», возможное на момент  $t$  (за время  $\tau$ ), как и в рассмотренном выше случае подавления функции обнаружения НСЗ, равно  $N_{\text{фр},\tau} - n + 1$ . Поскольку вероятность пропуска НС в анализируемом элементе разрешения равна  $(1-D)$ , то вероятность выполнения критерия «Пропуск НС  $n$  раз подряд» при однократном испытании критерия одинакова для всех испытаний и равна  $(1 - D)^n$ . Событие «Потеря НС сопровождаемого НСЗ» реализуется, если на момент  $t$  имел место положительный исход хотя бы одного испытания рассматриваемого критерия. При независимых испытаниях вероятность  $P_{\text{потери.НС},\tau}$  такого события (вероятность потери НС за время  $\tau$ ) подчиняется биномиальному закону распределения вероятностей. Основываясь на [54], для вероятности срыва сопровождения  $P_{\text{срыва сопр.НСЗ},\tau} = P_{\text{потери.НС},\tau}$  за время  $\tau$ , прошедшее от момента начала действия АП, получим соотношение:

$$P_{\text{срыва сопр.НСЗ},\tau} = 1 - (1 - (1 - D)^n)^{(N_{\text{фр},\tau} - n + 1)}. \quad (2.16)$$

На рисунках 2.15, 2.16, 2.17 приведено графическое представление функции (2.16) от времени срыва сопровождения  $\tau$  при фиксированных значениях вероятности  $D$ , параметра  $n$  и длительности накапливаемого фрагмента  $\tau_{\text{фр}}$ .

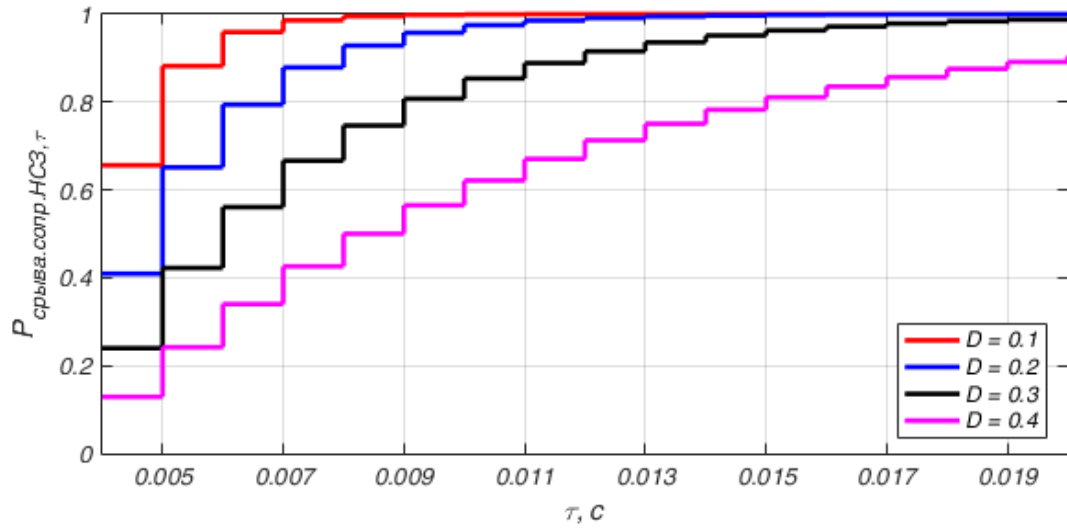


Рисунок 2.15 - Зависимость вероятности  $P_{\text{срыва сопр.НСЗ}, \tau}$  от  $\tau$  при  $n = 4$  и  $\tau_{\text{фр}} = 0.001$  с

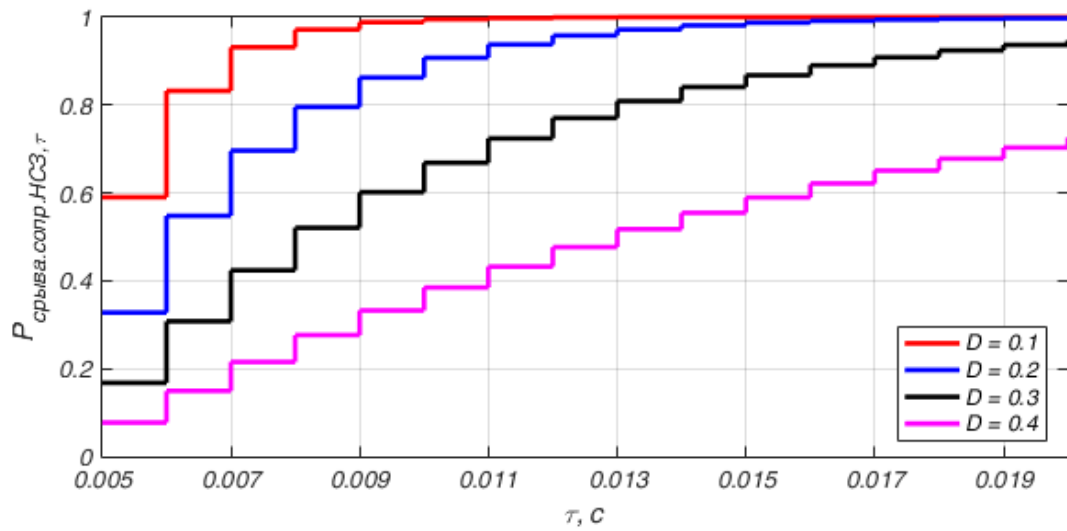


Рисунок 2.16 - Зависимость вероятности  $P_{\text{срыва сопр.НСЗ}, \tau}$  от  $\tau$  при  $n = 5$  и  $\tau_{\text{фр}} = 0.001$  с

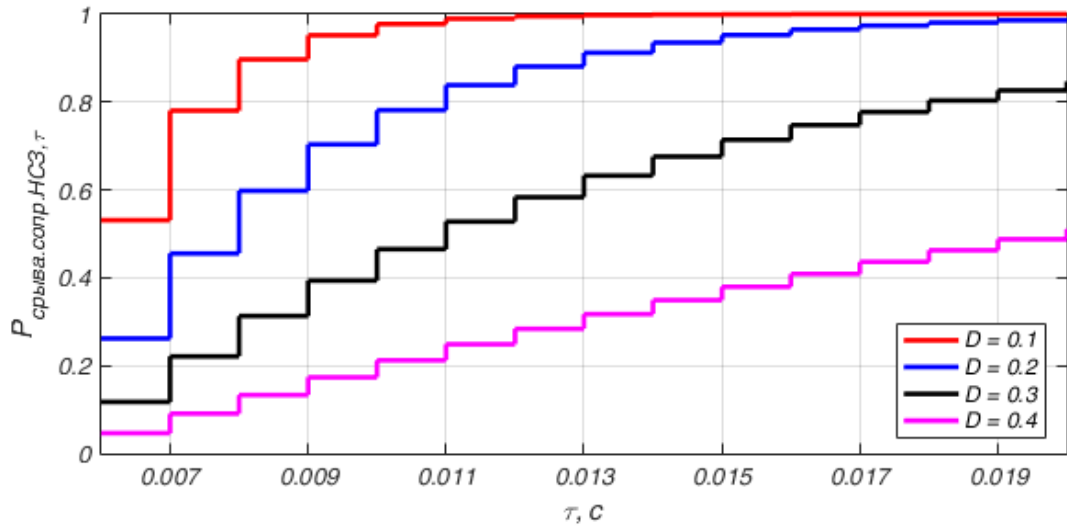


Рисунок 2.17 - Зависимость вероятности  $P_{\text{срыва.сопр.НСЗ},\tau}$  от  $\tau$  при  $n = 6$  и  $\tau_{\text{фр}} = 0.001$  с

На рисунках 2.18, 2.19 приведено графическое представление функции (2.16) от вероятности  $D$  при фиксированных значениях времени срыва сопровождения  $\tau$ , параметра  $n$  и длительности накапливаемого фрагмента  $\tau_{\text{фр}}$ .

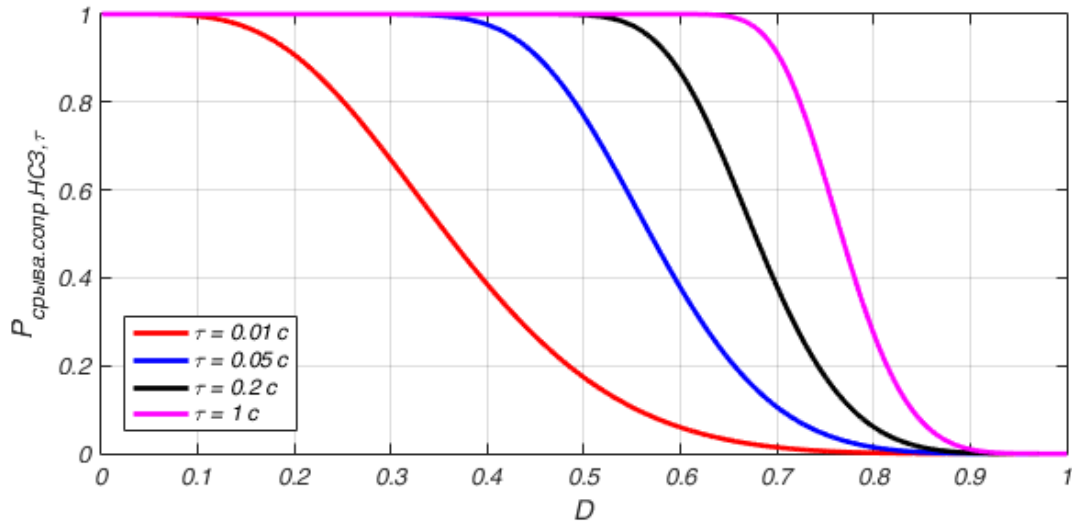


Рисунок 2.18 - Зависимость вероятности  $P_{\text{срыва.сопр.НСЗ},\tau}$  от  $D$  при  $n = 5$  и  $\tau_{\text{фр}} = 0.001$  с

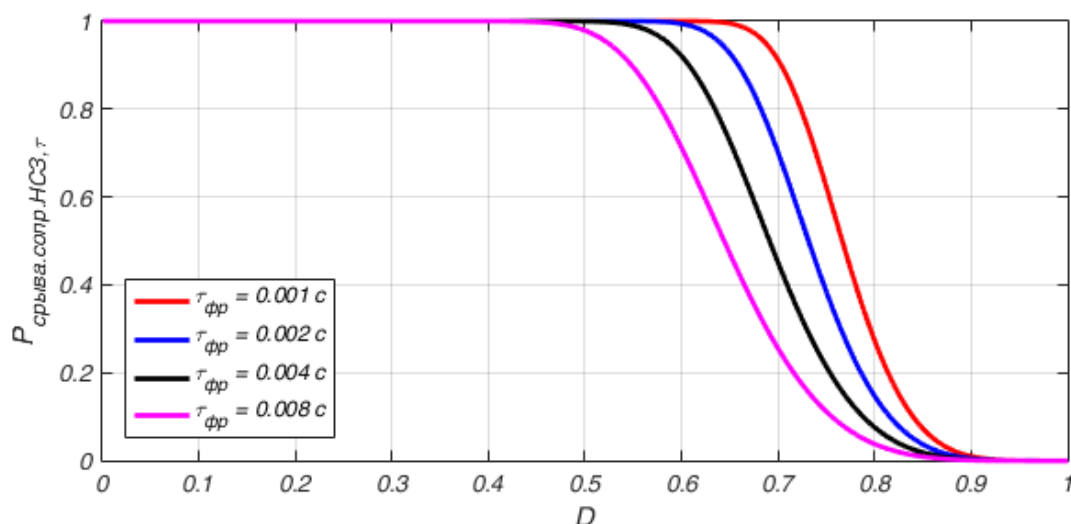


Рисунок 2.19 - Зависимость вероятности  $P_{\text{срыва сопр.НСЗ,}\tau}$  от  $D$  при  $n = 5$  и  $\tau = 1$  с

Зависимость  $P_{\text{срыва сопр.НСЗ,}\tau}$  от  $\tau$  имеет ступенчатый характер, т.к. в формуле (2.16) время срыва сопровождения  $\tau$  входит  $N_{\text{фр,}\tau}$ , при этом область определения функции начинается от момента  $n\tau_{\text{фр}}$  (число прошедших испытаний должно быть не менее одного за время  $\tau$ ). Логично предположить, что в процессе сопровождения вероятность ложной тревоги  $F$  может быть существенно снижена до  $10^{-1} \dots 10^{-2}$ . Увеличение вероятности  $D$  приводит к уменьшению вероятности  $P_{\text{срыва сопр.НСЗ,}\tau}$  при фиксированном времени срыва сопровождения  $\tau$  и параметре  $n$ . Увеличение параметра  $n$  (количества пропусков НС подряд) также приводит к уменьшению  $P_{\text{срыва сопр.НСЗ,}\tau}$  при фиксированном времени срыва сопровождения  $\tau$  и вероятности  $D$ .

Определим время  $\tau_{\text{срыва сопр.НСЗ,}P^*}$ , требуемое для реализации срыва сопровождения НСЗ (за счет потери НС) с заданной вероятностью  $P^*$ . Для этого следует найти число испытаний рассматриваемого критерия, которое нужно провести, чтобы этот критерий выполнялся хотя бы один раз с вероятностью не менее  $P^*$ . С учетом того, что доступное на момент  $t$  количество испытаний равно  $N_{\text{фр,}\tau} - n + 1$ , необходимое для обеспечения заданной вероятности  $P^*$  количество фрагментов НС  $N_{\text{фр,треб.}P^*}$  определяется соотношением

$$N_{\text{фр,треб.}P^*} \geq \frac{\ln(1-P^*)}{\ln(1-(1-D)^n)} + n - 1. \quad (2.17)$$

Зная продолжительность  $\tau_{\text{фр}}$  фрагмента НС, обрабатываемого в корреляторе, с помощью (2.17) найдем

$$\tau_{\text{срыва сопр.НСЗ,}P^*} \geq \left[ \frac{\ln(1-P^*)}{\ln(1-(1-D)^n)} + n - 1 \right] (\tau_{\text{фр}} N_{\text{фр}}). \quad (2.18)$$



На рисунках 2.20, 2.21, 2.22 приведено графическое представление функции (2.18) (нижняя граница) от вероятности  $D$  при фиксированных значениях вероятности срыва сопровождения  $P^*$ , параметра  $n$  и длительности накапливаемого фрагмента  $\tau_{\text{фр}}$ .

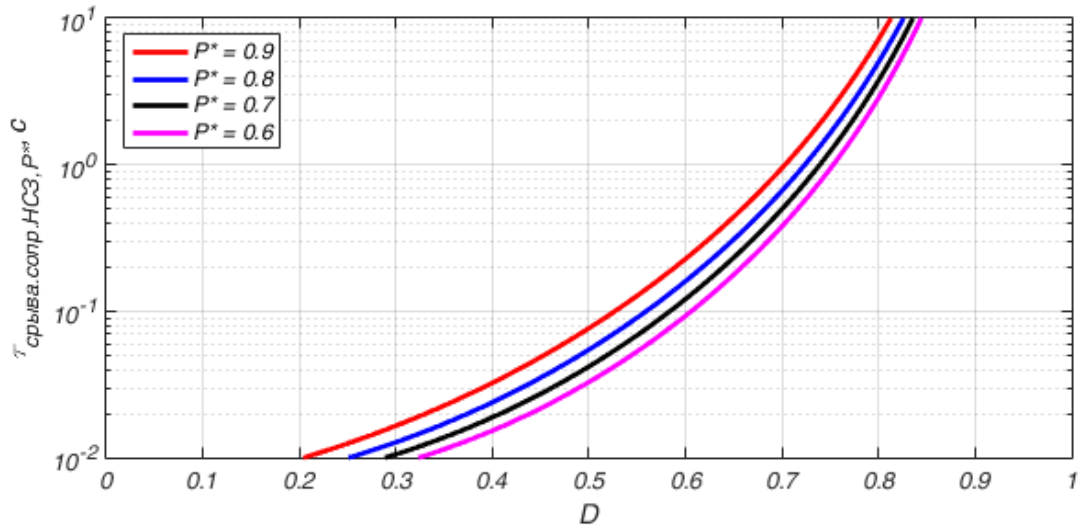


Рисунок 2.20 - Зависимость времени  $\tau_{\text{срыва.сопр.НСЗ}, P^*}$  от  $D$  при  $n = 5$  и  $\tau_{\text{фр}} = 0.001$  с

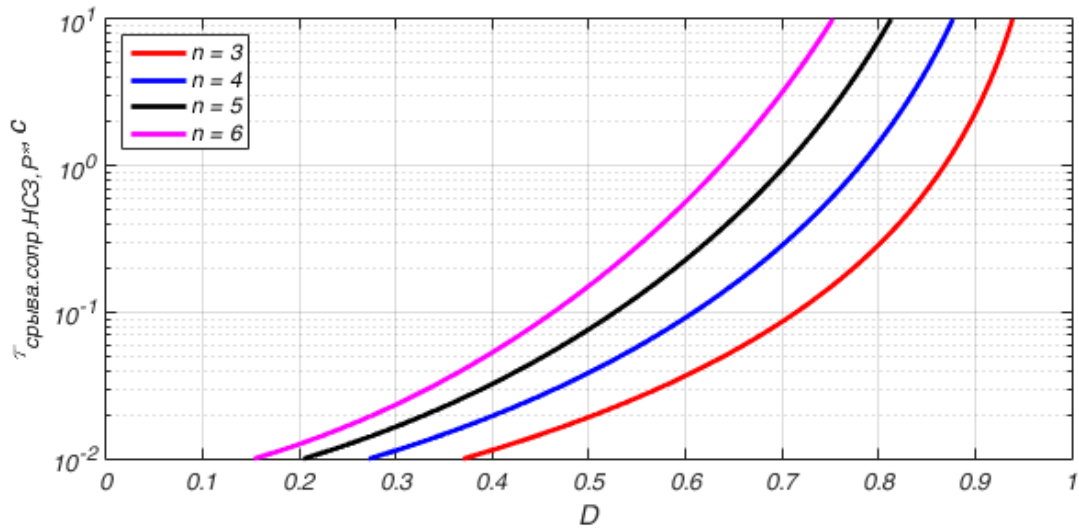


Рисунок 2.21 - Зависимость времени  $\tau_{\text{срыва.сопр.НСЗ}, P^*}$  от  $D$  при  $P^* = 0.9$  и  $\tau_{\text{фр}} = 0.001$  с

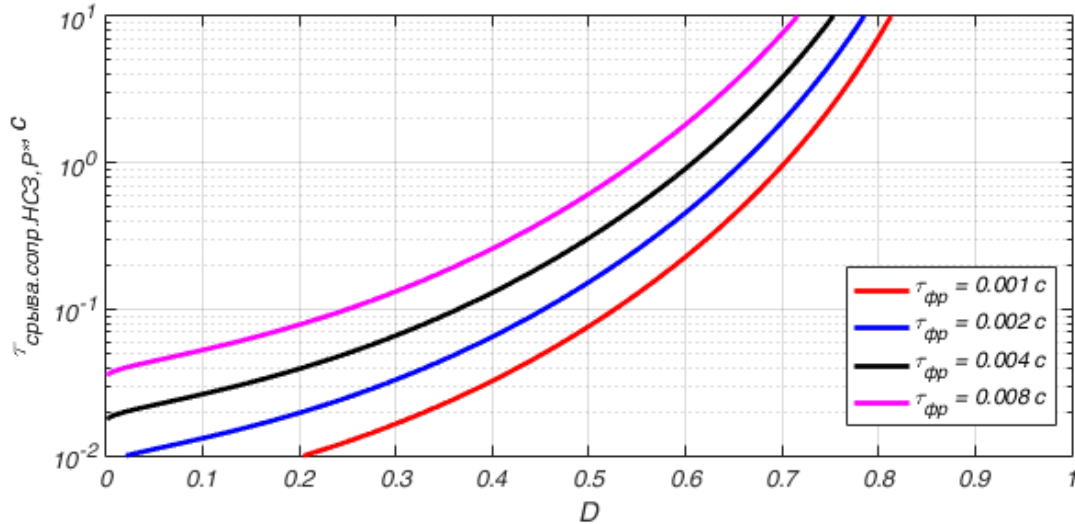


Рисунок 2.22 - Зависимость времени  $\tau_{\text{срыва.сопр.НСЗ,P}^*}$  от  $D$  при  $n = 5$  и  $P^* = 0.9$

Минимальное время  $\tau_{\text{срыва.сопр.НСЗ,P}^*}$ , требуемое для срыва сопровождения НСЗ с вероятностью  $P^*$ , увеличивается с ростом вероятностей  $D$  и  $P^*$ . Увеличение количества пропусков НС, необходимых для выполнения заданного критерия, также приводит увеличению времени  $\tau_{\text{срыва.сопр.НСЗ,P}^*}$ . Увеличение длительности накопления фрагментов НС в корреляторе приводит к увеличению требуемого времени  $\tau_{\text{срыва.сопр.НСЗ,P}^*}$  при заданной вероятности  $P^*$ , что обусловлено уменьшением количества доступных испытаний при выполнении критерия «Пропуск НС  $n$  раз подряд».

Результаты расчетов, выполняемых на основе соотношений (2.16) и (2.18), позволяют определить значения вероятности  $D$  (при фиксированной вероятности  $F$ ), при которых обеспечиваются заданные уровни показателей качества подавления НАП – вероятностного показателя  $\text{ПК}_{\text{под}} = P_{\text{срыва.сопр.НСЗ},\tau}$  и временного показателя  $\text{ПК}_{\text{под}} = \tau_{\text{срыва.сопр.НСЗ,P}^*}$ .

По полученным значениям вероятности  $D$  определяются значения выходного ОСШ  $q_{\text{Вых}}^2$  коррелятора подавляемой НАП, которые должны быть обеспечены путем создания АП. Затем на основе (2.5) могут быть рассчитаны соответствующие коэффициенты подавления функции сопровождения НСЗ  $K_{\text{под}}^{(\text{подтв. присутст. НС})}(P_{\text{срыва.сопр.НСЗ},\tau})$  и  $K_{\text{под}}^{(\text{подтв. присутст. НС})}(\tau_{\text{срыва.сопр.НСЗ,P}^*})$ .

В таблицах 2.6, 2.7 представлены расчётные значения коэффициентов подавления подтверждения присутствия НС с вероятностным показателем качества подавления для следующих исходных данных:

- 1) вероятность срыва сопровождения НСЗ  $P_{\text{срыва.сопр.НСЗ},\tau} = 0.9$  за время срыва  $\tau = 1$  с;
- 2) вероятность  $F$  равна  $10^{-2}$ ;

- 3) база НС  $B_{НС}$  равна 2046, 20460 и 30690 соответственно;
- 4) время накопления фрагмента НС в корреляторе 1 и 4 мс соответственно;
- 5) параметр  $n$  равен 6 и 10 соответственно.

Таблица 2.6 - Расчетные значения  $K_{\text{под}}^{(\text{подтв. присутст. НС})}$  при критерии срыва сопровождения НС «шесть подряд»

Вероятность $F$	$10^{-2}$					
	1			4		
Длительность накопления $\tau_{\text{фр}}$ , мс						
База НС	2046	20460	30690	2046	20460	30690
$K_{\text{под}}^{(\text{обн.НСЗ})}(P_{\text{срыва сопр.НСЗ,}\tau)$ , дБ	23.5	33.5	35.2	31	41	42.8

Таблица 2.7 - Расчетные значения  $K_{\text{под}}^{(\text{подтв. присутст. НС})}$  при критерии срыва сопровождения НС «десять подряд»

Вероятность $F$	$10^{-2}$					
	1			4		
Длительность накопления $\tau_{\text{фр}}$ , мс						
База НС	2046	20460	30690	2046	20460	30690
$K_{\text{под}}^{(\text{обн.НСЗ})}(P_{\text{срыва сопр.НСЗ,}\tau)$ , дБ	30.3	40.3	42	37.9	47.9	49.6

#### *Показатель качества подавления функции слежения за параметрами НС*

Слежение за параметрами НС (несущей, задержкой) осуществляется соответствующими следящими контурами, имеющимися в составе НАП. Сигнал ошибки в дискриминаторе контура слежения вырабатывается на каждом такте на основе фактически получаемых выходных величин корреляторов. Факт срыва слежения за параметром НС фиксируется на основе анализа последовательности значений сигнала ошибки (выходной величины дискриминатора контура слежения за параметром). При этом могут использоваться различные критерии срыва слежения. В [1] в качестве критерия срыва слежения рассматривается «вероятность выхода мгновенной ошибки слежения за пределы рабочего участка дискриминационной характеристики». Если ошибка слежения  $\varepsilon$  имеет гауссовское распределение вероятностей с нулевым математическим ожиданием и дисперсией  $D_{\varepsilon} = \sigma_{\varepsilon}^2$ , то вероятность однократного выхода за пределы рабочего участка ДХ  $P_{\varepsilon 1}$  определяется соотношением

$$P_{\varepsilon 1} = 1 - \Phi\left(\frac{\varepsilon_{\text{гр}}}{\sigma_{\varepsilon}}\right), \quad (2.19)$$

где  $\Phi(\dots)$  - интеграл вероятностей (функция Лапласа);

$\varepsilon_{гр}$  - граница рабочего участка ДХ, равная половине апертуры линейного участка.

С точки зрения интересов данной работы, наибольший интерес представляет критерий срыва слежения вида «выход величины мгновенной ошибки слежения за пределы рабочего участка ДХ в  $p$  тактах подряд» (кратко - «выход за пределы ДХ  $p$  раз подряд»). В частном случае, когда при обработке каждого фрагмента НС вероятность выхода величины мгновенной ошибки слежения за пределы ДХ  $P_{\varepsilon 1} = 1$ , то критерий реализуется за время  $p\tau_{фр}$  после начала действия АП. Если же вероятность  $P_{\varepsilon 1} < 1$ , то для решения задачи срыва слежения (выполнение установленного критерия) за рассматриваемым параметром требуется большее время, причем с уменьшением  $P_{\varepsilon 1}$  это время увеличивается.

Получим соотношения для расчета вероятности срыва слежения за параметром НС как функции времени, потраченного на реализацию срыва (время от момента  $t_0$  начала действия АП), а также для расчета времени, требуемого для решения задачи срыва слежения путем создания АП.

Пусть на текущий момент времени  $t$ , отсчитываемый от момента  $t_0$  начала процедуры срыва слежения НСЗ (момента начала действия АП), величина  $\tau = t - t_0 > \tau_{фр}$ . Тогда количество  $N_{фр,\tau}$  обработанных на момент  $t$  в корреляторе НАП фрагментов НС также определяется согласно (2.7).

Количество опытов по проверке критерия «выход за пределы ДХ  $p$  раз подряд», возможное на момент  $t$  равно  $N_{фр,\tau} - p + 1$ . Событие «Срыв слежения за параметром НС» реализуется, если за время  $N_{фр,\tau}$  имел место положительный исход хотя бы одного испытания рассматриваемого критерия. При независимых испытаниях вероятность такого события можно вычислить на основе биномиального закона распределения вероятностей. А именно, для вероятности срыва слежения  $P_{срыва\ слеж,\tau}$  за время  $\tau$ , прошедшее от момента  $t_0$  начала действия АП, получим соотношение:

$$P_{срыва\ слеж,\tau} = 1 - (1 - P_{\varepsilon 1}^p)^{(N_{фр,\tau} - p + 1)}. \quad (2.20)$$

Определим также количество времени  $\tau_{срыва\ слеж,P^*}$ , требуемого для реализации срыва слежения за параметром НС с заданной вероятностью  $P^*$ . Для этого следует найти число испытаний рассматриваемого критерия, которое нужно провести, чтобы этот критерий выполнялся хотя бы один раз с вероятностью не менее  $P^*$ . С учетом того, что возможное на текущий момент  $t$  количество проверок критерия равно  $N_{фр,\tau} - p + 1$ , то требуемое для обеспечения заданной вероятности  $P^*$  количество фрагментов НС  $N_{фр,треб.P^*}$  определяется соотношением

$$N_{\text{фр. треб.}, P^*} \geq \frac{\ln(1-P^*)}{\ln(1-P_{\epsilon 1}^p)} + p - 1. \quad (2.21)$$

Зная продолжительность  $\tau_{\text{фр}}$  фрагмента НС, обрабатываемого в корреляторе, найдем, что

$$\tau_{\text{срыва слез.}, P^*} \geq \left[ \frac{\ln(1-P^*)}{\ln(1-P_{\epsilon 1}^p)} + p - 1 \right] (\tau_{\text{э}} N_{\text{э}}). \quad (2.22)$$

На рисунках 2.23, 2.24, 2.25, 2.26 приведено графическое представление функции (2.20) при фиксированных значениях времени срыва слежения  $\tau$ , параметра  $p$  и длительности накопления фрагмента НС  $\tau_{\text{фр}}$ .

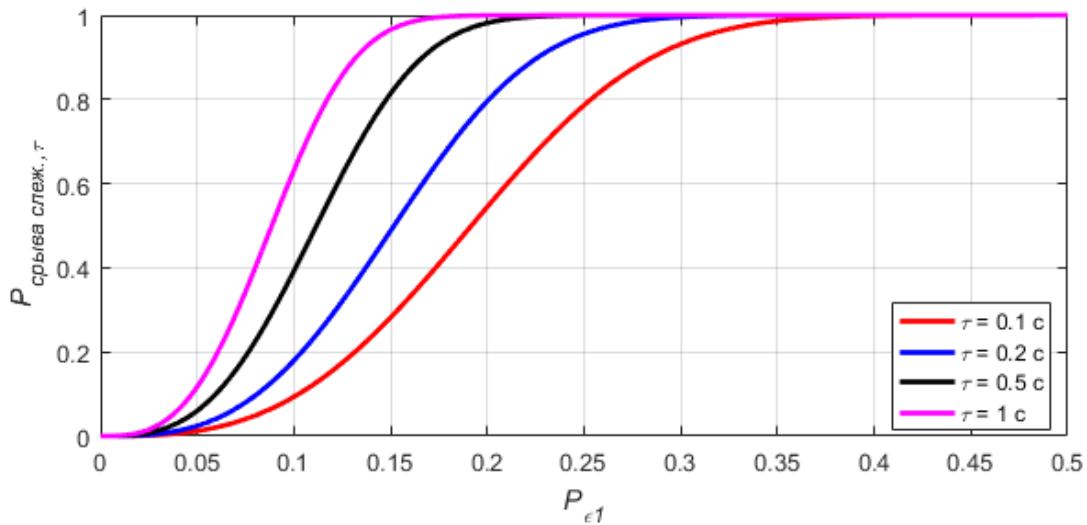


Рисунок 2.23 - Зависимость вероятности  $P_{\text{срыва слез.}, \tau}$  от  $P_{\epsilon 1}$  при  $p = 3$ ,  $\tau_{\text{фр}} = 1$  мс

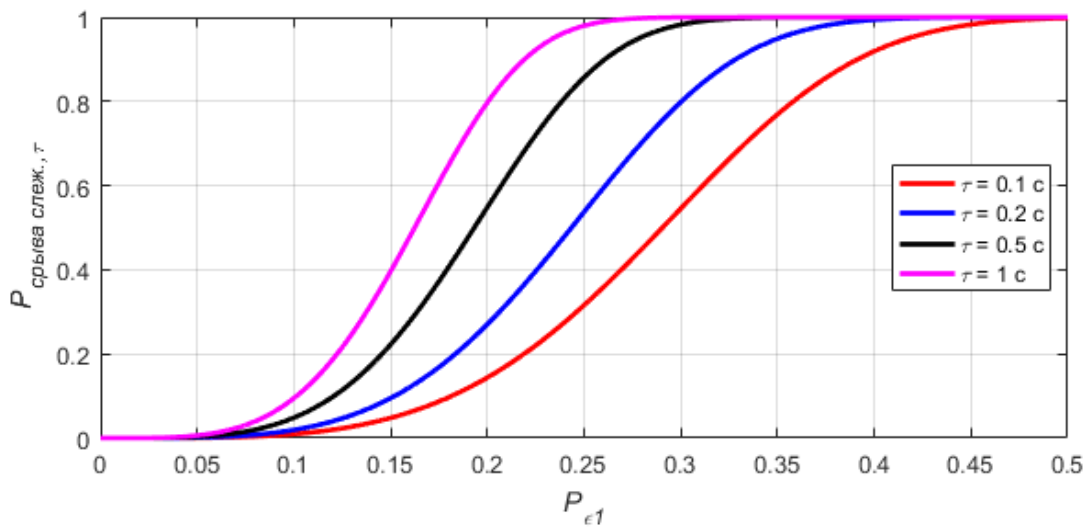


Рисунок 2.24 - Зависимость вероятности  $P_{\text{срыва слез.}, \tau}$  от  $P_{\epsilon 1}$  при  $p = 4$ ,  $\tau_{\text{фр}} = 1$  мс

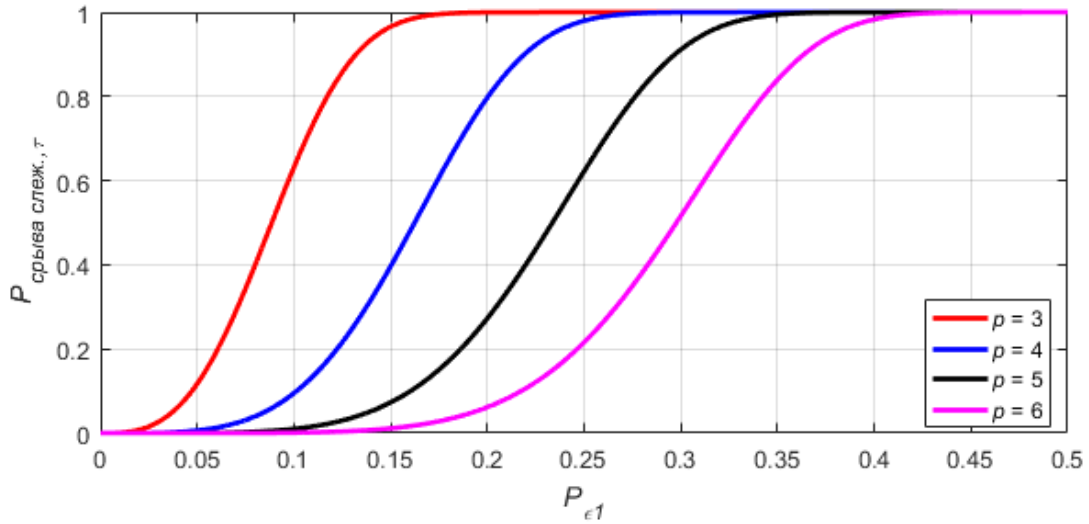


Рисунок 2.25 - Зависимость вероятности  $P_{\text{срыва слезж, } \tau}$  от  $P_{\epsilon 1}$  при  $\tau = 1$  с,  $\tau_{\text{фр}} = 1$  мс

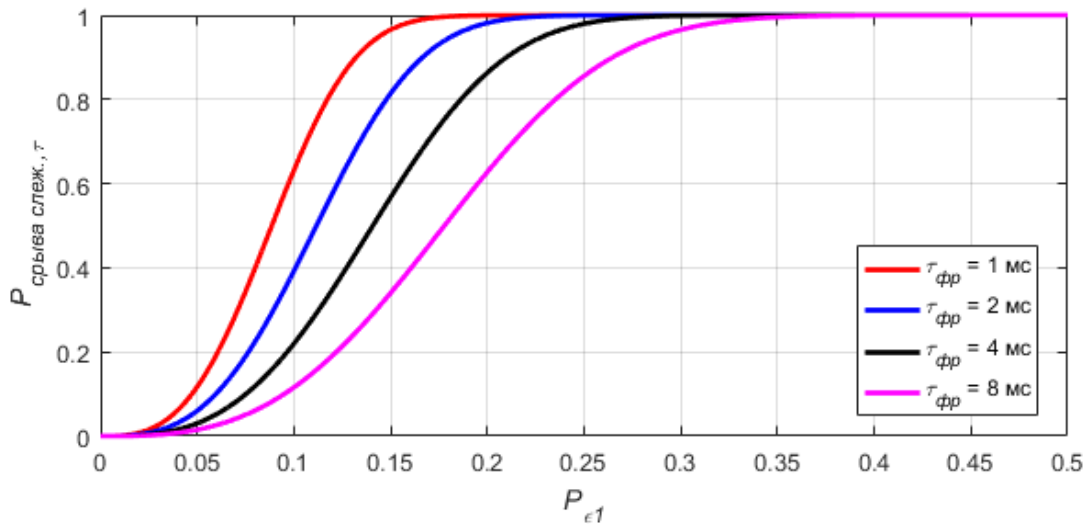


Рисунок 2.26 - Зависимость вероятности  $P_{\text{срыва слезж, } \tau}$  от  $P_{\epsilon 1}$  при  $\tau = 1$  с,  $p = 3$

На рисунке 2.27 приведено графическое представление функции (2.22) при фиксированных значениях вероятности срыва  $P^*$  и параметра  $p$ .

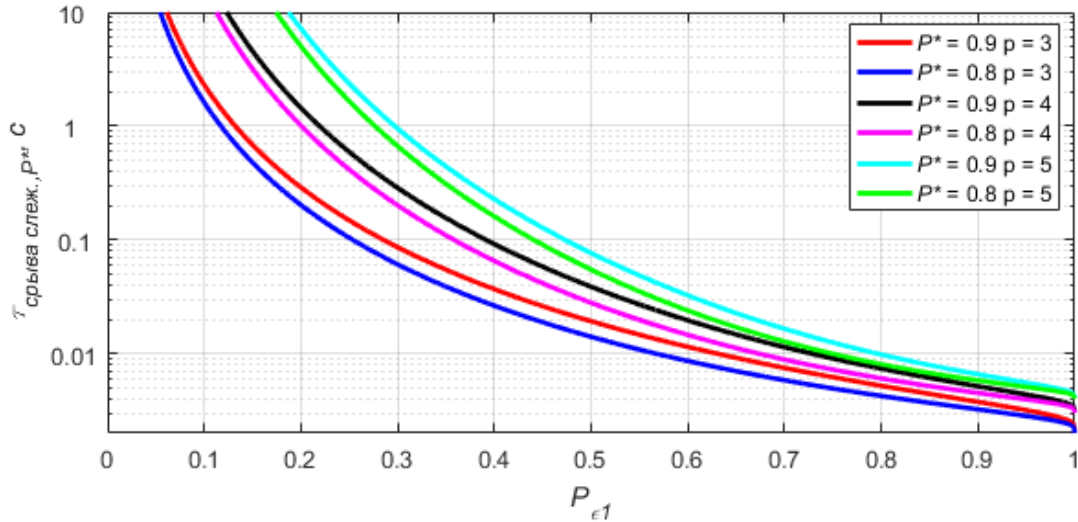


Рисунок 2.27 - Зависимость времени  $\tau_{\text{срыва слеж., } P^*}$  (нижняя граница) от вероятности  $P_{\epsilon 1}$

С увеличением времени срыва  $\tau$  вероятность срыва слежения  $P_{\text{срыва слеж., } \tau}$  увеличивается при заданном уровне вероятности однократного выхода мгновенной ошибки слежения за апертуру ДХ  $P_{\epsilon 1}$ . Вероятность срыва слежения за параметрами  $P_{\text{срыва слеж., } \tau}$  уменьшается с ростом критериального параметра  $\rho$  и длительности накопления фрагмента НС  $\tau_{\text{фр}}$  в корреляторе. Время срыва слежения  $\tau_{\text{срыва слеж., } P^*}$ , в течении которого с вероятностью  $P^*$  гарантировано произойдет срыв слежения, увеличивается с ростом критериального параметра  $\rho$  при фиксированном значении вероятности  $P_{\epsilon 1}$ .

Результаты расчетов, выполняемых на основе соотношения (2.20) и (2.22) позволяют определить значения вероятности  $P_{\epsilon 1}$ , при которых обеспечиваются заданные уровни показателей качества подавления НАП в виде вероятности  $P_{\text{срыва слеж., } \tau}$  срыва слежения за параметром НС в течение заданного времени  $\tau$  и времени  $\tau_{\text{срыва слеж., } P^*}$ , требуемого для срыва слежения за параметром НС с заданной вероятностью  $P^*$ .

Дисперсия флуктуационной ошибки слежения  $D_{\epsilon}$  для фазового и частотного дискриминаторов может быть определена согласно [1,32].

Для фазового дискриминатора дисперсия ошибки слежения за фазой  $D_{\epsilon\varphi}$  определена следующим соотношением:

$$D_{\epsilon\varphi} = \frac{\Delta F \cdot \tau_{\text{фр}}}{q_{\text{ВЫХ}}^2} \left( 1 + \frac{1}{2 \cdot q_{\text{ВЫХ}}^2} \right), \quad (2.23)$$

где  $\Delta F$  – эквивалентная шумовая полоса, Гц;

$\tau_{\text{фр}}$  – время накопления фрагмента НС в корреляторе, с.

Для частотного дискриминатора дисперсия ошибки слежения за частотой  $D_{\epsilon f}$  определена

следующим соотношением:

$$D_{\varepsilon f} = \frac{2\Delta F}{\pi^2 \tau_{\text{фр}} q_{\text{ввых}}^2} \left(1 + \frac{1}{q_{\text{ввых}}^2}\right). \quad (2.24)$$

Таким образом, на основе выражений (2.20) и (2.21) находится значение вероятности  $P_{\varepsilon 1}$  для выбранного критерия срыва слежения в виде вероятности  $P_{\text{срыва слеж.}\tau}$  срыва слежения за параметром НС в течение заданного времени  $\tau$  или времени  $\tau_{\text{срыва слеж.}P^*}$ , требуемого для срыва слежения за параметром НС с заданной вероятностью  $P^*$ . По полученному значению вероятности  $P_{\varepsilon 1}$  на основе (2.19) определяется  $D_{\varepsilon} = \sigma_{\varepsilon}^2$  дисперсия ошибки слежения, которая должна быть обеспечена при действии АП. Затем, решая уравнения (2.23) и (2.24) относительно  $q_{\text{ввых}}^2$  для полученных значений  $D_{\varepsilon}$ ,  $\Delta F$  и  $\tau_{\text{фр}}$  находим требуемое значение  $q_{\text{ввых}}^2$ , при котором, например, с заданной вероятностью  $P_{\text{срыва слеж.}\tau}$  за время срыва слежения  $\tau$  произойдет срыв слежения за параметрами НС (фазой и частотой соответственно). Далее на основе формулы (2.5) рассчитывается коэффициент подавления функции слежения за параметрами НС:  $K_{\text{под}}^{\text{срыва.слеж.}\tau}(P_{\text{срыва слеж.}\tau})$  и  $K_{\text{под}}^{\text{срыва.слеж.}\tau}(\tau_{\text{срыва слеж.}P^*})$ .

В таблицах 2.8, 2.9 представлены расчетные значения коэффициентов подавления функции слежения за фазой и частотой с вероятностным показателем качества подавления ( $P_{\text{срыва слеж.}\tau}$ ) для следующих исходных данных:

- 1) вероятность срыва слежения за фазой и частотой  $P_{\text{срыва слеж.}\tau} = 0.9$ ;
- 2) время срыва слежения за фазой и частотой 0.2, 0.5 и 1 с соответственно;
- 3) параметр  $p = 3$  и 5;
- 4) шумовая полоса фазового дискриминатора  $\Delta F = 20$  Гц;
- 5) шумовая полоса частотного дискриминатора  $\Delta F = 10$  Гц;
- 6) база НС  $B_{\text{НС}} = 2046, 20460$  и  $30690$  соответственно;
- 7) время накопления фрагмента НС в корреляторе  $\tau_{\text{фр}} = 1$  мс.

Таблица 2.8 - Коэффициенты подавления функции слежения за фазой (дБ) в когерентном приемнике при  $\Delta F = 20$  Гц

Параметр $p$		3			5		
База НС		2046	20460	30690	2046	20460	30690
$\tau, \text{с}$	0.2	43.6	53.6	56.6	45.5	55.5	58.3
	0.5	43	53	56	44.8	54.8	57.8
	1	42.5	52.5	55.7	44.3	54.3	57.4



Таблица 2.9 - Коэффициенты подавления функции слежения за частотой (дБ) в некогерентном приемнике при  $\Delta F = 10$  Гц

Параметр $p$		3			5		
База НС		2046	20460	30690	2046	20460	30690
τ, с	0.2	45.5	55.5	58.4	47.3	57.3	60.1
	0.5	44.9	54.9	57.9	46.6	56.6	59.5
	1	44.5	54.5	57.5	46.2	56.2	59.2

### 2.3 Условие радиоподавления навигационной аппаратуры потребителей с учетом внутрисистемных факторов и средств помехозащиты

Построение и функционирование средств приема и обработки сигналов в составе НАП обладает существенной спецификой, наличие которой обуславливает необходимость модификации условия подавления, представленного в традиционном виде (2.1). Специфика определяется следующими обстоятельствами.

1. Современные и перспективные образцы НАП, как правило, располагают различными средствами защиты от преднамеренных радиопомех (см. раздел 1). Наличие средств помехозащиты повышает требования к энергетике АП, создаваемых для подавления НАП. Поэтому учет действия средств помехозащиты необходим при формулировке условий радиоподавления НАП.

2. Подавляемые образцы НАП, расположенные в пределах территории, для защиты которой создано ПНПР, как правило, подвергаются одновременному воздействию со стороны  $N_{\text{ПАП}} > 1$  постановщиков помех из состава ПНПР. Иначе говоря, в пределах ПНПР реализуется коллективное радиоподавление НАП. Ясно, что при коллективном радиоподавлении НАП требования к мощности каждого из  $\text{ПАП}_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, N_{\text{ПАП}}$ , действующих в составе ПНПР, могут быть снижены.

3. Подавляемые образцы НАП в процессе функционирования могут работать в различных режимах, а именно:

- поиск НС по задержке и частоте;
- обнаружение рабочего НСЗ;
- сопровождение НСЗ, включающее подтверждение присутствия НС и слежение за параметрами НС (фазой и частотой несущей, задержкой огибающей НС). Радиоподавление НАП, работающих в указанных режимах, имеет существенные особенности, в том числе и в отношении

требуемой энергетике АП. Учет этих особенностей, позволяет снизить требования к мощности ПАП.

4. Собственный шум (СШ) радиоприемных устройств НАП обычно многократно превышает по мощности полезный НС (до 27 дБ и более [1,32]) и существенно влияет на процессы обнаружения НС и слежения за его параметрами. Учет этого обстоятельства при формулировании условия подавления позволяет снизить требования к мощности АП.

5. Спецификой СРНС является наличие внутрисистемных помех (ВП). В любой текущий момент на НАП кроме «рабочего» НС действуют НС, излучаемые на той же частоте всеми НСЗ, находящимися выше линии горизонта. Следовательно, на входе приемника НАП, как правило, действует многокомпонентная помеха внутрисистемного происхождения. Отклики на «нерабочие» НС на выходе корреляторов НАП создают помехи маскирующего действия приему «рабочих» НС. Учет вклада помех внутрисистемного происхождения в мешающий фон на выходах корреляторов НАП также может снизить требования к мощности преднамеренных АП.

Таким образом, условие подавления (2.1) необходимо модифицировать с учетом того факта, что в процессе радиоподавления НАП на входе ее приемного тракта действует многокомпонентная помеха в виде аддитивной смеси  $\Pi = \text{АП} + \text{СШ} + \text{ВП}$ , при этом подавляемая НАП может работать в различных режимах, характеризующихся различной помехоустойчивостью, а в ее составе, как правило, имеются средства защиты от преднамеренных АП. Рассмотрение вопросов учета перечисленных выше факторов при формулировке условий радиоподавления НАП проще всего начать с учета собственного шума и внутрисистемных помех.

### 2.3.1 Учет действия собственного шума и внутрисистемных помех

Для учета наличия СШ и ВП представим традиционное условие подавления (2.1) в эквивалентном ему виде

$$\frac{P_{\text{НС вых}}}{P_{\text{П вых}}} = q_{\text{НС/П вых}}^2 \leq q_{\text{вых.треб}}^2, \quad (2.25)$$

где  $q_{\text{НС/П вых}}^2$  - отношение (НС/помеха) по мощности на выходе коррелятора НАП;

$q_{\text{вых.треб}}^2 = q_{\text{вых}}^2(\text{ПК}_{\text{под}})$  - величина отношения (2.25), при которой обеспечивается требуемое качество подавления НАП, определяемое величиной  $\text{ПК}_{\text{под}}$ .

Если помеха, действующая на входе приемника НАП, имеет равномерную СПМ в полосе его пропускания, то для величины  $q_{\text{НС/П вых}}^2$  справедливо

$$q_{\text{НС/П вых}}^2 = 2B_{\text{НС}} q_{\text{НС/П вх}}^2 K_{\text{пот}}^{-1}, \quad (2.26)$$

где  $q_{\text{НС/П вх}}^2$  - отношение (НС/суммарная помеха) по мощности на входе приемника НАП;

$K_{\text{пот}} \geq 1$  - коэффициент потерь величины  $q_{\text{НС/П Вых}}^2$ , всегда имеющих место из-за неидеальности корреляционной обработки.

Если СПМ помехи неравномерная, то корректное определение величины  $q_{\text{НС/П Вых}}^2$  возможно путем введения в (2.26) дополнительного множителя - т.н. «коэффициента качества помехи», характеризующего маскирующую способность помехи. Коэффициент качества помехи будем определять как отношение

$$K_{\text{кач П}} = \frac{\left( \frac{P_{\text{ш.эт. вх}}/P_{\text{НС вх}}}{P_{\text{П вх}}/P_{\text{НС вх}}} \right) \Big| q_{\text{Вых}}^2 = q_{\text{Вых.треб}}^2,$$

где  $P_{\text{П вх}}$  - мощность рассматриваемой помехи на входе подавляемого приемника в полосе его пропускания;

$P_{\text{ш.эт.вх}}$  - мощность эталонного шума (шума с равномерной СПМ) на входе приемника в полосе его пропускания;

$q_{\text{Вых}}^2$  - отношение НС/помеха (эталонный шум) по мощности на выходе коррелятора НАП;

$q_{\text{Вых.треб}}^2$  - значение величины  $q_{\text{Вых}}^2$ , при котором обеспечивается требуемое значение  $\text{ПК}_{\text{под}}$ .

Коэффициент качества помехи при таком его определении показывает во сколько раз мощность этой помехи на входе приемника в полосе его пропускания должна быть больше (меньше) мощности эталонного шума, чтобы обеспечить одинаковую с ним величину  $q_{\text{Вых}}^2 = q_{\text{Вых.треб}}^2$  при приеме одного и того же НС. Следовательно, реальная помеха П на входе приемника НАП может быть заменена эквивалентной ей помехой  $\text{П}_{\text{эkv}}$  с равномерной СПМ, мощность которой

$$P_{\text{П.эkv.вх}} = P_{\text{П.вх}} K_{\text{кач.П}}. \quad (2.27)$$

Эквивалентность понимается в смысле неизменности величины  $q_{\text{Вых}}^2$  при замене реальной помехи на входе эквивалентной ей помехой. Если помеха многокомпонентная, то вместо (2.27) справедливо

$$P_{\text{П.эkv.вх}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{П}}} P_{\text{П}i.\text{вх}} K_{\text{кач.П}i}, \quad (2.28)$$

где  $N_{\text{П}}$  - число компонентов помехи;

$P_{\text{П}i.\text{вх}}$  и  $K_{\text{кач.П}i}$  - мощность и коэффициент качества  $i$ -го компонента.

С учетом того, что в рассматриваемом случае компонентами суммарной помехи являются СШ, многокомпонентная ВП и АП, а также с учетом (2.28) соотношение (2.26) представим в виде

$$q_{\text{НС/П Вых}}^2 = \frac{2 B_{\text{НС}}}{K_{\text{пот}}} \left( \frac{P_{\text{П.эkv.вх}}}{P_{\text{НС вх}}} \right)^{-1} = \frac{2 B_{\text{НС}}}{K_{\text{пот}}} \left( \frac{P_{\text{СШ вх}} K_{\text{кач СШ}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{ВП}}} P_{\text{ВП}i.\text{вх}} K_{\text{кач.ВП}i} + P_{\text{АП вх}} K_{\text{кач. АП}}}{P_{\text{НС вх}}} \right)^{-1} =$$

$$= \frac{2 B_{\text{НС}}}{K_{\text{пот}} \left( q_{\text{СШ/НС вх}}^2 K_{\text{кач.СШ}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{ВП}}} q_{\text{ВП}i/\text{НС вх}}^2 K_{\text{кач.ВП}i} + q_{\text{АП/НС вх}}^2 K_{\text{кач.АП}} \right)}, \quad (2.29)$$

где  $P_{\text{СШ вх}}, P_{\text{АП вх}}$  - мощности СШ и АП на входе приемника НАП;

$K_{\text{кач. СШ}}, K_{\text{кач. АП}}$  - коэффициенты качества СШ и АП;

$P_{\text{ВП}i.\text{вх}}$  и  $K_{\text{кач.ВП}i}$  - мощность на входе и коэффициент качества  $i$  - го компонента ВП.

$$q_{\text{СШ/НС вх}}^2 = \frac{P_{\text{СШ вх}}}{P_{\text{НС вх}}},$$

$$q_{\text{ВП}i/\text{НС вх}}^2 = \frac{P_{\text{ВП}i.\text{вх}}}{P_{\text{НС вх}}},$$

$$q_{\text{АП/НС вх}}^2 = \frac{P_{\text{АП вх}}}{P_{\text{НС вх}}}$$

- отношения: (СШ/НС), (ВП $i$ /НС), (АП/НС) по мощности на входе приемника НАП в полосе пропускания НС ( $i = 1, 2, \dots, N_{\text{ВП}}$ ).

Вопросы, связанные с определением коэффициентов качества различных радиопомех, имеют важное самостоятельное значение. Из общих соображений можно утверждать, что значения коэффициентов качества реальных маскирующих помех могут быть как меньше, так и больше единицы.

Мощность внутрисистемных помех в полосе пропускания приемника при обработке полезного НС существенно зависит от их спектральных характеристик. В таблице 2.10 показаны потери мощности сигналов СРНС GPS на частоте L1 при приеме и обработке различных сигналов НС в соответствующих полосах пропускания приемника.

Таблица 2.10 - Потери мощности (дБ) ВП на входе приемника в полосе НС

Полоса сигнала, x 1.023 МГц	2	20	30	4	14
Тип НС	С/А, L2СМ	P(Y), Q <sub>5</sub> , I <sub>5</sub>	М	L1C <sub>d</sub>	L1C <sub>p</sub>
BPSK(1)	0.44	0.04	0.02	0.22	0.06
BPSK(10)	7.1	0.41	0.25	4.12	0.54
BOCsin(10,5)	25.1	2.3	0.46	17.02	9.22
BOCsin(1,1)	1.9	0.12	0.07	0.67	0.19
TMBOC(6,1,1/11)	2.6	0.2	0.15	1.26	0.29

Из таблицы 2.10 видно, например, что мощность внутрисистемной помехи с модуляцией BOCsin(10,5) при приеме сигнала с модуляцией BPSK(1) с полосой 2.046 МГц уменьшается на 25.1 дБ, а при воздействии внутрисистемной помехи с модуляцией BPSK(10) на 7.1 дБ.

В таблице 2.11 представлены результаты оценки коэффициентов качества помех применительно к внутрисистемным помехам СРНС GPS (частота L1), источниками которых являются собственные НС с модуляцией видов BPSK(1) (сигнал C/A), BPSK(10) (сигнал P(Y)), BOCsin(10,5) (сигнал M) и TMBOC(6,1,1/11) (сигнал L1C), полученные путем имитационного моделирования воздействия эталонного шума и указанных помех на коррелятор НАП в среде Matlab. На рисунке 2.28 показаны спектрограммы огибающих НС с указанными модуляциями.

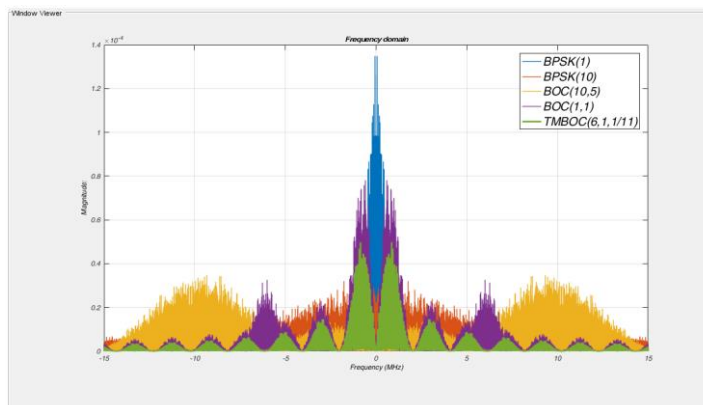


Рисунок 2.28 - Спектрограммы огибающих НС СРНС GPS

Таблица 2.11 - Коэффициенты качества помех (дБ)

Полоса сигнала, х 1.023 МГц	2	20	30	4	14
Тип НС	C/A, L2CM	P(Y), Q <sub>5</sub> , I <sub>5</sub>	M	L1C <sub>d</sub> (L1C <sub>p</sub> )	L1C <sub>p</sub>
Помеха BPSK(1)	2.1	3.2	-12.4	-1	3.7
Помеха BPSK(10)	0.1	2.1	-5.4	0.1	1.5
Помеха BOCsin(10,5)	-4.6	-5.2	3.4	-2.1	-2.7
Помеха BOCsin(1,1)	-2.6	3	-7.5	2.5	6.5
Помеха TMBOC(6,1,1/11)	-2.4	2.7	-7.1	2.6	6.2

Примечание: коэффициенты качества помех получены относительно помехи типа дискретным белый гауссовский шум, ограниченным в полосе анализируемого сигнала НС.

На рисунках 2.29 представлены в графическом виде результаты расчетов, выполненных на основе соотношения (2.29), при следующих исходных данных:

- количество НСЗ, создающих внутрисистемные помехи – 8;
- каждый НСЗ излучает на частоте L1 четыре НС, имеющих модуляцию BPSK(1), BPSK(10), BOCsin(10,5), BOCsin(1,1) (L1C<sub>d</sub>) и TMBOC(6,1,1/11) (L1C<sub>p</sub>), гарантированная мини-

мальная мощность которых на входе приемника НАП в полосе пропускания 30,69 МГц, расположенного у поверхности Земли, показана в таблице 1.1;

- коэффициенты качества СШ и компонентов ВП соответствуют таблице 2.11;

- коэффициент качества АП  $K_{\text{кач. АП}} = 1$  (АП имеет равномерную СПМ в пределах полосы пропускания приемника НАП);

- коэффициенты потерь ОСШ приняты в соответствии с таблицей 2.10;

- значения величин  $q_{\text{СШ/НС вх}}^2$  и  $q_{\text{ВПi/НС вх}}^2$ , присутствующих в (2.29), соответствуют таблице 2.12, содержимое которой получено методом имитационного моделирования. Эти значения зависят от соотношения полосы частот полезного НС и соответствующих компонентов ВП, какими являются:

ВП<sub>1</sub> – сумма НС с модуляцией BPSK(1) от восьми НСЗ;

ВП<sub>2</sub> – сумма НС с модуляцией BPSK(10) от восьми НСЗ;

ВП<sub>3</sub> – сумма НС с модуляцией ВОСsin(10,5) от восьми НСЗ;

ВП<sub>4</sub> – сумма НС с модуляцией ВОСsin(1,1) от восьми НСЗ;

ВП<sub>5</sub> – сумма НС с модуляцией ТМВОС(6,1,1/11) от восьми НСЗ.

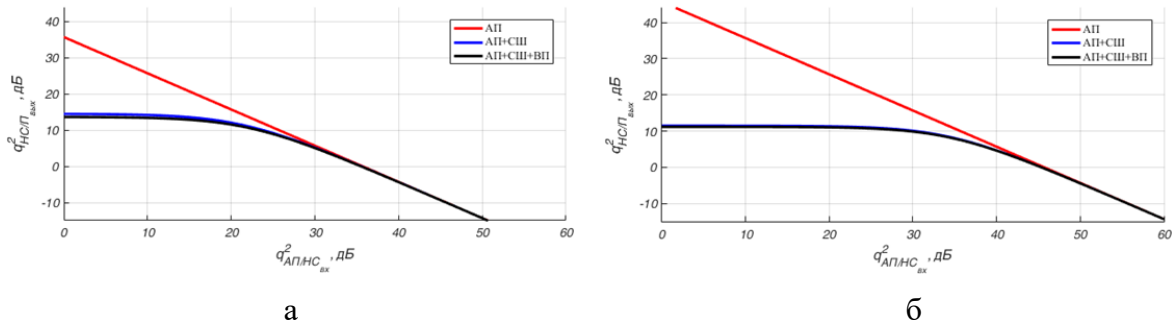


Рисунок 2.29 - Отношение НС/П на выходе как функция отношения АП/НС на входе:

а -  $B_{\text{НС}} = 2046$ , модуляция НС BPSK(1); б -  $B_{\text{НС}} = 20460$ , модуляция НС BPSK(10)

Таблица 2.12 - Отношение мощностей компонент ВП к НС на входе приемника НАП в полосе НС

Модуляция НС	$q_{\text{СШ/НС вх}}^2$ дБ	$q_{\text{ВП1/НС вх}}^2$ дБ	$q_{\text{ВП2/НС вх}}^2$ дБ	$q_{\text{ВП3/НС вх}}^2$ дБ	$q_{\text{ВП4/НС вх}}^2$ дБ	$q_{\text{ВП5/НС вх}}^2$ дБ
BPSK(1)	21.2	9	-0.5	-16.2	3	7
BPSK(10)	34.2	12.4	9	9.6	7.8	12.5

Модуляция НС	$q_{\text{СШ/НС вх}}^2$ дБ	$q_{\text{ВП1/НС вх}}^2$ дБ	$q_{\text{ВП2/НС вх}}^2$ дБ	$q_{\text{ВП3/НС вх}}^2$ дБ	$q_{\text{ВП4/НС вх}}^2$ дБ	$q_{\text{ВП5/НС вх}}^2$ дБ
BOCsin(10,5)	33.5	9.9	6.7	9	5.4	10.1
BOCsin(1,1)	29	13.9	7	-3.3	9	13.2
ТМВОС(6,1,1/11)	29.3	9	5.5	-0.6	4.4	9

Результаты расчетов показывают, что влияние внутрисистемных факторов на величину  $q_{\text{НС/П вых}}^2$  значительно при невысоких значениях величины  $q_{\text{АП/НС вх}}^2$ . С ростом величины  $q_{\text{АП/НС вх}}^2$  (с ростом мощности АП на входе) влияние внутрисистемных факторов на величину  $q_{\text{НС/П вых}}^2$  уменьшается. Влияние ВП относительно СШ пренебрежимо мало. Влияние СШ более заметно, им можно пренебречь лишь при достижении величиной  $q_{\text{АП/НС вх}}^2$  значений 25 дБ (при  $B_{\text{НС}} = 2046$ ) и 35 дБ (при  $B_{\text{НС}} = 20460$ ). Расчеты показывают аналогичные зависимости и для других типов НС (М-код, L1C<sub>d</sub>, L1C<sub>p</sub>).

Возвращаясь к исходному условию подавления НАП, представленному в виде (2.1), выразим величину

$$q_{\text{АП/НС вх}}^2 = \frac{P_{\text{АП вх}}}{P_{\text{НС вх}}} = \frac{1}{q_{\text{НС/АП вх}}^2}$$

через другие содержащиеся в (2.29) величины. После преобразований получим условие подавления НАП в традиционной форме, аналогичной (2.1):

$$\frac{P_{\text{АП вх}}}{P_{\text{НС вх}}} \geq \frac{1}{K_{\text{кач АП}}} \left[ \frac{2 B_{\text{НС}}}{q_{\text{вых}}^2(\text{ПК}_{\text{под}})K_{\text{пот}}} - K_{\text{кач СШ}} q_{\text{СШ/НС вх}}^2 - \sum_{i=1}^{N_{\text{ВП}}} q_{\text{ВП}i/\text{НС вх}}^2 K_{\text{кач ВП}i} \right]. \quad (2.30)$$

В соответствии с (2.1) правая часть неравенства (2.30), очевидно, определяет коэффициент подавления НАП активной маскирующей радиопомехой, а именно

$$K_{\text{под НАП}}(\text{ПК}_{\text{под}}) = \frac{1}{K_{\text{кач АП}}} \left[ \frac{2 B_{\text{НС}}}{q_{\text{вых}}^2(\text{ПК}_{\text{под}})K_{\text{пот}}} - K_{\text{кач СШ}} q_{\text{СШ/НС вх}}^2 - \sum_{i=1}^{N_{\text{ВП}}} q_{\text{ВП}i/\text{НС вх}}^2 K_{\text{кач ВП}i} \right]. \quad (2.31)$$

Найденное условие подавления НАП, представленное в форме соотношений (2.30), (2.31), аналогичной традиционной форме (2.1), учитывает тот факт, что в процессе радиоподавления НАП на ее входе наряду с преднамеренной АП неизбежно присутствуют также СШ и ВП. Кроме того, полученное выражение позволяет также оценить коэффициент подавления при воздействии на НАП оптимизированной структурной помехи (например, суммы сигналоподобных помех), что позволяет определить наиболее оптимальную помеху для радиоподавления одновременно нескольких НС.

На рисунке 2.30 представлены графики функции  $K_{\text{под НАП}}(\text{ПК}_{\text{под}}) = f_2(q_{\text{вых}}^2(\text{ПК}_{\text{под}})) = f_2(q_{\text{вых. треб}}^2)$ , определяемой соотношением (2.31) при прежних исходных данных.

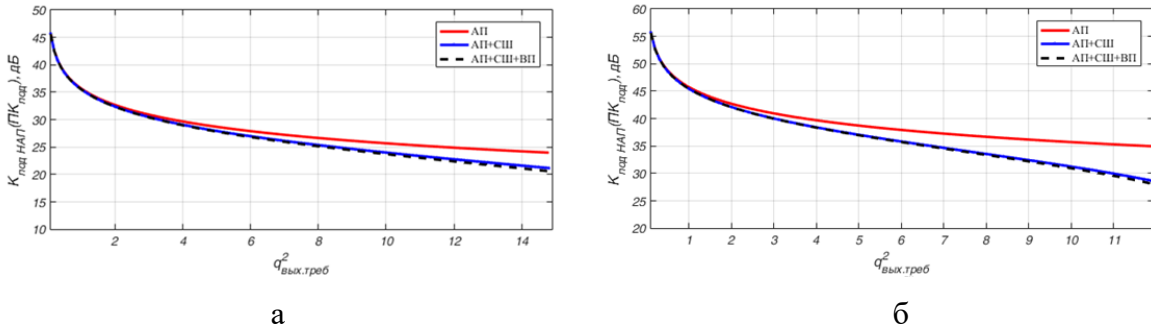


Рисунок 2.30 - Коэффициент подавления НАП как функция требуемого отношения НС/П на выходе: а -  $B_{НС} = 2046$ , б -  $B_{НС} = 20460$

Анализ графиков, представленных на рисунках 2.30, позволяет сделать выводы о влиянии учета рассматриваемых внутрисистемных факторов на величину коэффициента подавления НАП. А именно, влиянием помех внутрисистемного происхождения можно пренебречь практически при любых представляющих интерес значениях  $q_{\text{вых. треб}}^2$  (при любом требуемом качестве радиоподавления НАП). Что касается СШ приемника НАП, то его влияние на величину  $K_{\text{под}}(q_{\text{вых. треб}}^2)$  более существенное. Уменьшение величины  $K_{\text{под}} \text{ НАП}$  при учете действия СШ достигает (1...5) дБ ( $q_{\text{вых. треб}}^2 = 10$ ). При малых значениях  $q_{\text{вых. треб}}^2$  (менее 5) влияние СШ на величину  $K_{\text{под}}$  пренебрежимо мало и не превышает (1...2) дБ.

### 2.3.2 Учет действия средств помехозащиты

Условие подавления НАП СРНС преднамеренными АП, представляемое в традиционной форме, определяется неравенством (2.30), и имеет вид:

$$q_{\text{АП/НС вх}}^2 = \frac{P_{\text{АП вх}}}{P_{\text{НС вх}}} \geq \frac{1}{K_{\text{кач АП}}} \left[ \frac{2 B_{НС}}{q_{\text{вых. треб}}^2 K_{\text{пот}}} - K_{\text{кач СШ}} q_{\text{СШ/НС вх}}^2 - \sum_{i=1}^{N_{\text{ВП}}} q_{\text{ВП}i/\text{НС вх}}^2 K_{\text{кач ВП}i} \right], \quad (2.32)$$

где  $q_{\text{АП/НС вх}}^2$  - отношение  $P_{\text{АП вх}}/P_{\text{НС вх}}$  мощности АП к мощности НС на входе приемника НАП;

$q_{\text{вых. треб}}^2 = q_{\text{вых. треб}}^2(\text{ПК}_{\text{под}})$  - требуемое значение величины  $q_{\text{вых}}^2 = \frac{P_{\text{НС вх}}}{P_{(\text{АП}+\text{СШ}+\text{ВП})\text{вых}}}$  отношения мощности НС к суммарной мощности АП, ВП и СШ на выходе коррелятора НАП (при котором достигается требуемый уровень показателя качества подавления  $\text{ПК}_{\text{под}}$ ).

Правая часть (2.32) представляет собой коэффициент подавления НАП  $K_{\text{под. НАП}}(\text{ПК}_{\text{под}})$  (2.31), зависящий от показателя качества подавления  $\text{ПК}_{\text{под}}$ . В качестве  $\text{ПК}_{\text{под}}$  может быть использована непосредственно величина выходного ОСП  $q_{\text{вых}}^2$ . Более содержательными характеристиками качества подавления НАП являются показатели, рассмотренные в разделе 2.2.1. К ним



относятся:

- 1) вероятность  $P_{\text{необн. НСЗ } \tau}$  предотвращения обнаружения НСЗ в течение заданного времени  $\tau$ ;
- 2) времени  $\tau_{\text{необн.НСЗ,Р}^*}$  предотвращения обнаружения НСЗ с заданной вероятностью  $P^*$ ;
- 3) вероятность  $P_{\text{срыва сопр. НСЗ } \tau}$  срыва сопровождения рабочего НСЗ за заданное время  $\tau$ ;
- 4) время  $\tau_{\text{срыва сопр.НСЗ,Р}^*}$  от момента начала действия помехи, за которое с заданной вероятностью  $P^*$  обеспечивается срыв сопровождения НСЗ;
- 5) вероятность  $P_{\text{срыва слеж. } \tau}$  срыва слежения за фазой, несущей частотой и задержкой кода НС в течение заданного времени  $\tau$ ;
- 6) время  $\tau_{\text{срыва слеж. } P^*}$ , требуемое для срыва слежения за фазой, несущей частотой и задержкой кода НС с заданной вероятностью  $P^*$ .

Следует отметить, что все указанные показатели однозначно связаны с величиной  $q_{\text{вых}}^2$ .

Условие подавления (2.32) имеет важное значение при обосновании требований к параметрам ПНПР. Однако оно может быть непосредственно использовано лишь в случаях, когда в составе подавляемых НАП отсутствуют средства защиты от преднамеренных АП. Вместе с тем, вопросы радиоподавления помехозащищенных образцов НАП представляют наибольший интерес. Задача данного раздела состоит в модернизации условия (2.32) в направлении учета возможного наличия в составе подавляемых образцов НАП различных средств защиты от преднамеренных АП. При этом представляет интерес рассмотрение случаев подавления НАП как одиночным ПАП, так и коллективного подавления, когда на НАП воздействуют несколько ПАП. Оба случая могут быть использованы в интересах объективно-территориальной защиты, а также противодействия опасным объектам.

### 2.3.2.1 Подавление НАП одиночным ПАП

Анализ литературных источников, результаты которого отражены в разделе 1, показывает, что основными средствами помехозащиты (ПЗ), применения которых следует ожидать в современных и перспективных образцах НАП, могут быть средства пространственной (пространственно-временной), поляризационной и частотной режекции радиопомех, а также пространственной и поляризационной селекции НС.

Для учета наличия в составе НАП указанных средств ПЗ представим условие (2.32) в раз-

вернутом виде. Для рассматриваемого случая действия на НАП одиночного точечного ПАП фигурирующие в левой части неравенства (2.32) величины могут быть определены произведениями:

$$P_{\text{АП вх}} = \text{ППМ}_{\text{АП}}^{\text{НАП}} S_{\text{НАП}}^{\text{ПАП}} \gamma_{\text{НАП}}^{\text{ПАП}}; \quad (2.33)$$

$$P_{\text{НС вх}} = \text{ППМ}_{\text{НС}}^{\text{НАП}} S_{\text{НАП}}^{\text{НСЗ}} \gamma_{\text{НАП}}^{\text{НСЗ}}, \quad (2.34)$$

где  $\text{ППМ}_{\text{АП}}^{\text{НАП}}$  - плотность потока мощности излучения ПАП в точке расположения НАП;  
 $\text{ППМ}_{\text{НС}}^{\text{НАП}}$  - плотность потока мощности излучения НС рабочего НСЗ в точке расположения НАП;

$S_{\text{НАП}}^{\text{ПАП}}$  и  $S_{\text{НАП}}^{\text{НСЗ}}$  - эффективная площадь антенны НАП в направлениях ПАП и НСЗ соответственно;

$\gamma_{\text{НАП}}^{\text{ПАП}} \leq 1$  и  $\gamma_{\text{НАП}}^{\text{НСЗ}} \leq 1$  - коэффициенты, учитывающие рассогласование поляризации антенны НАП с антеннами ПАП и НСЗ соответственно.

Если антенны НАП, НСЗ и ПАП апертурные, то для присутствующих в (2.33), (2.34) величин  $S_{\text{НАП}}^{\text{ПАП}}$  и  $S_{\text{НАП}}^{\text{НСЗ}}$  справедливы стандартные соотношения:

$$S_{\text{НАП}}^{\text{ПАП}} = \frac{G_{\text{НАП}}^{\text{ПАП}} \lambda^2}{4\pi}, \quad (2.35)$$

$$S_{\text{НАП}}^{\text{НСЗ}} = \frac{G_{\text{НАП}}^{\text{НСЗ}} \lambda^2}{4\pi}, \quad (2.36)$$

где  $G_{\text{НАП}}^{\text{ПАП}}$  и  $G_{\text{НАП}}^{\text{НСЗ}}$  - коэффициенты усиления антенны НАП в направлениях ПАП и НСЗ соответственно.

С учетом (2.35), (2.36) условие подавления (2.32) принимает вид:

$$q_{\text{АП/НС вх}}^2 = \frac{\text{ППМ}_{\text{АП}}^{\text{НАП}} G_{\text{НАП}}^{\text{ПАП}} \gamma_{\text{НАП}}^{\text{ПАП}}}{\text{ППМ}_{\text{НС}}^{\text{НАП}} G_{\text{НАП}}^{\text{НСЗ}} \gamma_{\text{НАП}}^{\text{НСЗ}}} \geq K_{\text{под НАП}} (\text{ПК}_{\text{под}}). \quad (2.37)$$

Условие подавления НАП, представленное в виде (2.37), позволяет учесть в явном виде наличие у подавляемой НАП средств ПЗ, связанных с антенной. Рассматривая левую часть соотношения (2.37), нетрудно видеть следующее.

*Сомножитель*  $\text{ППМ}_{\text{АП}}^{\text{НАП}} / \text{ППМ}_{\text{НС}}^{\text{НАП}}$  численно равен величине отношения  $P_{\text{АП вх}} / P_{\text{НС вх}}$  (левая часть (2.37)), которая достигается, если

$$G_{\text{НАП}}^{\text{ПАП}} = G_{\text{НАП}}^{\text{НСЗ}},$$

$$\gamma_{\text{НАП}}^{\text{ПАП}} = \gamma_{\text{НАП}}^{\text{НСЗ}},$$

что может иметь место, когда антенна НАП - изотропная, а поляризация антенны ПАП совпадает с поляризацией антенны НСЗ. При этом реализуется полное отсутствие пространственной и поляризационной селекции НС и режекции АП.

*Сомножитель*  $G_{\text{НАП}}^{\text{ПАП}} / G_{\text{НАП}}^{\text{НСЗ}}$  отражает зависимость величины отношения  $P_{\text{АП вх}} / P_{\text{НС вх}}$  от коэффициентов усиления антенны НАП в направлениях ПАП и НСЗ. Величину, обратную этому

множителю, логично трактовать как коэффициент улучшения отношения  $P_{\text{НС вх}}/P_{\text{АП вх}}$  средствами пространственной обработки сигналов (пространственной селекции НС и пространственной режекции АП), имеющимися в составе НАП.

$$K_{\text{ул}}^{(\text{простр.обр})} = \frac{\left(\frac{P_{\text{НС вх}}}{P_{\text{АП вх}}}\right)_{\text{при наличии простр. обр.}}}{\left(\frac{P_{\text{НС вх}}}{P_{\text{АП вх}}}\right)_{\text{при отсутствии простр. обр.}}} \quad (2.38)$$

Как указано выше, отсутствие пространственной обработки (смотри знаменатель (2.38)) имеет место, когда антенна НАП – изотропная с коэффициентом усиления  $G_{\text{изотр}} = 1$ .

Учесть отдельно влияние пространственной селекции и пространственной режекции на величину  $K_{\text{ул}}^{(\text{простр.обр})}$  можно путем преобразования рассматриваемого сомножителя, умножив его числитель и знаменатель на константу  $G_{\text{изотр}}$ . Для величины, обратной рассматриваемому множителю, получим произведение

$$\left(\frac{G_{\text{НАП}}^{\text{НС3}}}{G_{\text{изотр}}}\right) \left(\frac{G_{\text{изотр}}}{G_{\text{НАП}}^{\text{ПАП}}}\right) = K_{\text{ул}}^{(\text{простр.обр})} = K_{\text{ул}}^{(\text{простр.сел})} K_{\text{ул}}^{(\text{простр.реж})}, \quad (2.39)$$

в котором, очевидно,

$$\left(\frac{G_{\text{НАП}}^{\text{НС3}}}{G_{\text{изотр}}}\right) = K_{\text{ул}}^{(\text{простр.сел})} = \frac{\left(\frac{P_{\text{НС вх}}}{P_{\text{АП вх}}}\right)_{\text{при наличии простр.сел}}}{\left(\frac{P_{\text{НС вх}}}{P_{\text{АП вх}}}\right)_{\text{при отсутствии простр.сел}}} = G_{\text{НАП}}^{\text{НС3}} \quad (2.40)$$

- коэффициент улучшения отношения  $P_{\text{НС вх}}/P_{\text{АП вх}}$  средствами пространственной селекции НС;

$$\left(\frac{G_{\text{изотр}}}{G_{\text{НАП}}^{\text{ПАП}}}\right) = K_{\text{ул}}^{(\text{простр.реж})} = \frac{\left(\frac{P_{\text{НС вх}}}{P_{\text{АП вх}}}\right)_{\text{при наличии простр. реж}}}{\left(\frac{P_{\text{НС вх}}}{P_{\text{АП вх}}}\right)_{\text{при отсутствии простр. реж}}} = \frac{1}{G_{\text{НАП}}^{\text{ПАП}}} \quad (2.41)$$

- коэффициент улучшения отношения  $P_{\text{НС вх}}/P_{\text{АП вх}}$  средствами пространственной режекции АП.

Отметим, что, анализируя влияние пространственной обработки сигналов в НАП на величину отношения  $P_{\text{АП вх}}/P_{\text{НС вх}}$  на входе приемника НАП, представляет интерес рассматривать два случая.

*Первый случай* характеризуется тем, что используемая в составе подавляемой НАП антенна представляет собой одиночный антенный элемент (АЭ), ДН которого ориентирована в верхнюю полусферу, где расположены рабочие НСЗ. Коэффициент усиления такой антенны как функция углов в вертикальной и горизонтальной плоскостях зависит от размеров и конфигурации экрана, над которым расположен АЭ, и при симметричном экране для современных и перспективных разработок таких антенн составляет [3]:

- в направлении зенита ( $90^\circ$  относительно полотна антенны) - до (5...6) дБ;
- в направлениях горизонта ( $0^\circ$  при любом азимуте) – от минус 4 до минус 10 дБ.

В этом случае возможности пространственной селекции НС и режекции АП определяются только формой ДН АЭ. А именно, принимаются с усилением  $G_{\text{НАП}}^{\text{НС3}} > 1$  (до (5...6) дБ) НС от НСЗ, расположенных выше горизонта на угол не менее 10 градусов. Излучения ПАП, расположенных

ниже указанного угла, принимаются с усилением  $G_{\text{НАП}}^{\text{ПАП}} < 1$ , иначе говоря, режектируются. Соответственно, учитывая приведенные данные, можно утверждать, что в случае использования в составе НАП антенны в виде одиночного АЭ коэффициенты улучшения величины отношения  $P_{\text{НС ВХ}}/P_{\text{АП ВХ}}$  за счет пространственной селекции НС и режекции АП могут составлять, соответственно:  $K_{\text{ул}}^{(\text{простр.сел})}$  до (5...6) дБ,  $K_{\text{ул}}^{(\text{простр.реж})}$  до (20...25) дБ,  $K_{\text{ул}}^{(\text{простр.обр})}$  до 30 дБ в зависимости от угла между местной горизонталью НАП и направлениями на НСЗ и ПАП.

При несимметричном экране указанные выше значения усиления антенны, особенно относящиеся к области отрицательных углов в вертикальной плоскости, могут быть иными. В частности, если антенна НАП расположена над поверхностью металлического корпуса летательного аппарата (ЛА), то уровни ее ДН в области отрицательных углов будут различными для переднего, заднего и боковых ракурсов. Конкретные значения ДН зависят от размеров и конфигурации корпуса ЛА, а также от места размещения антенны.

*Второй случай* характеризуется тем, что используемая в составе НАП антенна представляет собой антенную решетку (АР), включающую несколько АЭ, подобных описанному выше, причем ДН этой АР может адаптивно управляться в зависимости от складывающейся помеховой обстановки. Результатом адаптации является формирование ДН с максимумами в направлениях рабочих НСЗ («фокусировка») и минимумами («провалами», «нулями») в направлениях ПАП [1,4,5]. При использовании адаптивной АР могут быть достигнуты гораздо большие значения коэффициентов улучшения  $K_{\text{ул}}^{(\text{простр.сел})}$ ,  $K_{\text{ул}}^{(\text{простр.реж})}$ , и, соответственно,  $K_{\text{ул}}^{(\text{простр.обр})}$ , чем в случае одиночного АЭ. В частности, согласно [5], а также по результатам экспериментов авторов данной работы на компьютерной имитационной модели адаптивной АР, коэффициент улучшения  $K_{\text{ул}}^{(\text{простр.обр})}$  может достигать 56 дБ и более.

Следует отметить, что имеющиеся возможности адаптации ДН зависят от наличия и конфигурации экранирующих поверхностей, влияющих на формирование ДН. Если элементы ААР имеют лишь малые экраны (экран-корпус самого элемента), а экранирующее действие корпуса ЛА благодаря соответствующему размещению АР на нем пренебрежимо мало, то возможно формирование «провалов» ДН в направлениях ПАП как в верхнюю, так и в нижнюю полусферы. При этом, благодаря пространственно-временной обработке реализуются возможности режекции помех, создаваемых не только точечными, но и пространственно-протяженными источниками. К последним относятся отражения от подстилающей поверхности как результат многопутного распространения поля помехи на трассе «ПАП-НАП». Если размещение АР таково, что корпус ЛА представляет собой «большой экран» (размеры корпуса много больше длины волны), то адаптация ДН (фокусировка в направлениях НСЗ и формирование «провалов» в направлениях ПАП) возможна только в пределах той части верхней полусферы, которая не затенена экранирующей

поверхностью корпуса ЛА. Формирование «провалов» возможно также в направлениях границ перехода в область радиотени. В пределах теневой области форма ДН ААР определяется дифракционными явлениями на элементах корпуса ЛА, а уровни дифракционных лепестков ДН зависят от его размеров и конфигурации.

Существенно, что, несмотря на использование различных антенн, в обоих рассмотренных случаях характеристиками эффективности пространственной обработки сигналов в НАП являются коэффициенты улучшения отношения  $P_{\text{АП вых}}/P_{\text{НС вых}}$ , определяемые согласно (2.38), (2.39), (2.40), (2.41).

Следует отметить, что рассмотренное выше определение коэффициента улучшения отношения  $P_{\text{АП вых}}/P_{\text{НС вых}}$  средствами пространственной обработки, включающими одиночный АЭ или АР, может быть модифицировано, если учесть, что в (2.38)

$$\left( \frac{P_{\text{НС вых}}}{P_{\text{АП вых}}} \right)_{\text{при наличии простр. обр}} = \frac{P_{\text{НС вых АР}}}{P_{\text{АП вых АР}}},$$

$$\left( \frac{P_{\text{НС вых}}}{P_{\text{АП вых}}} \right)_{\text{при отсутствии простр. обр}} = \frac{P_{\text{НС вых. изотр}}}{P_{\text{АП вых. изотр}}} = \frac{\left( \frac{P_{\text{НС вых. АЭ}}}{G_{\text{АЭ}}^{\text{НС3}}} \right)}{\left( \frac{P_{\text{АП вых. АЭ}}}{G_{\text{АЭ}}^{\text{ПАП}}} \right)},$$

где  $P_{\text{НС вых АР}}$  и  $P_{\text{АП вых АР}}$  - мощности НС и АП на выходе АР;

$P_{\text{НС вых. изотр}}$  и  $P_{\text{АП вых. изотр}}$  - мощности НС и АП на выходе изотропной антенны;

$P_{\text{НС вых. АЭ}}$  и  $P_{\text{АП вых. АЭ}}$  - мощности НС и АП на выходе АЭ.

С учетом этих равенств для коэффициента улучшения вместо соотношения (2.38) справедливо

$$K_{\text{ул}}^{(\text{простр.обр})} = \frac{P_{\text{НС вых АР}} P_{\text{АП вых АЭ}} G_{\text{АЭ}}^{\text{НС3}}}{P_{\text{НС вых АЭ}} P_{\text{АП вых АР}} G_{\text{АЭ}}^{\text{ПАП}}} = K_{\text{пер НС}}^{(\text{АР})} K_{\text{осл АП}}^{(\text{АР})} \frac{G_{\text{АЭ}}^{\text{НС3}}}{G_{\text{АЭ}}^{\text{ПАП}}} = \frac{K_{\text{пер НС}}^{(\text{АР})} G_{\text{АЭ}}^{\text{НС3}}}{K_{\text{пер АП}}^{(\text{АР})} G_{\text{АЭ}}^{\text{ПАП}}}, \quad (2.42)$$

где

$$K_{\text{пер НС}}^{(\text{АР})} = \frac{P_{\text{НС вых АР}}}{P_{\text{НС вых АЭ}}},$$

$$K_{\text{пер АП}}^{(\text{АР})} = \frac{P_{\text{АП вых АР}}}{P_{\text{АП вых АЭ}}}$$

- коэффициенты передачи АР соответственно для НС и АП;

$$K_{\text{осл АП}}^{(\text{АР})} = \frac{P_{\text{АП вых АЭ}}}{P_{\text{АП вых АР}}} = \frac{1}{K_{\text{пер АП}}^{(\text{АР})}}$$

- коэффициент ослабления (подавления) АП за счет обработки в АР.

Множитель  $\gamma_{\text{НАП}}^{\text{ПАП}}/\gamma_{\text{НАП}}^{\text{НС3}}$  учитывает влияние средств поляризационной обработки сигналов, имеющихся в составе НАП, а также влияние рассогласования поляризации антенн НАП, НС3 и ПАП, на величину  $P_{\text{АП вых}}/P_{\text{НС вых}}$ . Величина, обратная множителю  $\gamma_{\text{НАП}}^{\text{ПАП}}/\gamma_{\text{НАП}}^{\text{НС3}}$ , очевидно, представ-

ляет собой коэффициент улучшения отношения  $P_{\text{НС вых}}/P_{\text{АП вых}}$  средствами поляризационной обработки сигналов, имеющимися в составе НАП:

$$K_{\text{ул}}^{(\text{поляриз.обр})} = \frac{\left( \frac{P_{\text{НС вых}}}{P_{\text{АП вых}}} \right)_{\text{при наличии поляриз. обр.}}}{\left( \frac{P_{\text{НС вых}}}{P_{\text{АП вых}}} \right)_{\text{при отсутствии поляриз. обр.}}}$$

Возможными видами поляризационной обработки в технике НАП являются поляризационная селекция НС и режекция АП, в том числе на базе ААР [55]. С учетом сказанного, в случае реализации в составе НАП средств поляризационной селекции НС и режекции АП, справедливо:

$$K_{\text{ул}}^{(\text{поляриз.обр})} = K_{\text{ул}}^{(\text{поляриз.сел})} K_{\text{ул}}^{(\text{поляриз.реж})} = \gamma_{\text{НАП}}^{\text{НСЗ}} / \gamma_{\text{НАП}}^{\text{ПАП}}$$

Наряду со средствами помехозащиты, связанными с антенной, в составе приемника НАП могут также содержаться средства частотной режекции преднамеренных АП (частотные режекторные фильтры (ЧРФ)). Частотная режекция может быть особенно эффективной как средство защиты НАП от узкополосных (сосредоточенных по спектру) помех, суммарная ширина спектра которых многократно меньше ширины спектра НС [1]. Примерами таких помех могут быть гармоническая и полигармоническая помехи, создаваемые на фиксированных или перестраиваемых частотах. Характеристикой помехозащитной эффективности ЧРФ является коэффициент улучшения отношения  $P_{\text{НС вых}}/P_{\text{АП вых}}$  на входе приемника НАП

$$\begin{aligned} K_{\text{ул}}^{(\text{частотн.реж})} &= \frac{\left( \frac{P_{\text{НС вых}}}{P_{\text{АП вых}}} \right)_{\text{при наличии частотн. реж}}}{\left( \frac{P_{\text{НС вых}}}{P_{\text{АП вых}}} \right)_{\text{при отсутствии частотн. реж}}} = \frac{P_{\text{НС вых ЧРФ}}}{P_{\text{НС вых}}} \times \frac{P_{\text{АП вых}}}{P_{\text{АП вых ЧРФ}}} = \\ &= K_{\text{пер НС}}^{(\text{ЧРФ})} K_{\text{осл АП}}^{(\text{ЧРФ})} = \frac{K_{\text{пер НС}}^{(\text{ЧРФ})}}{K_{\text{пер АП}}^{(\text{ЧРФ})}}, \end{aligned}$$

где

$$K_{\text{пер НС}}^{(\text{ЧРФ})} = \frac{P_{\text{НС вых ЧРФ}}}{P_{\text{НС вых}}},$$

$$K_{\text{пер АП}}^{(\text{ЧРФ})} = \frac{P_{\text{АП вых ЧРФ}}}{P_{\text{АП вых}}}$$

- коэффициенты передачи ЧРФ, соответственно, для НС и АП;

$$K_{\text{осл АП}}^{(\text{ЧРФ})} = \frac{P_{\text{АП вых ЧРФ}}}{P_{\text{АП вых}}} = \frac{1}{K_{\text{пер.АП}}^{(\text{ЧРФ})}}$$

- коэффициент ослабления АП устройством ЧРФ.

При использовании в составе ПНПР постановщиков узкополосных АП действие ЧРФ приводит к уменьшению отношения  $P_{\text{НС}}/P_{\text{АП}}$  в приемном тракте НАП, при этом величина  $K_{\text{ул}}^{(\text{частотн.реж})}$  может быть значительной. Что касается постановщиков широкополосных АП (например, шумовых АП с шириной спектра, близкой к полосе пропускания приемного тракта НАП или сигналоподобных АП), то применение ЧРФ для защиты от них, как правило, неэффективно.

С учетом рассмотренного выше, условие подавления НАП преднамеренной активной маскирующей помехой, вытекающее из (2.32), приобретает вид:

$$\left( \frac{\text{ППМ}_{\text{АП}}^{\text{НАП}}}{\text{ППМ}_{\text{НС}}^{\text{НАП}}} \right)_{\text{треб}} \geq K_{\text{под НАП}} (\text{ПК}_{\text{под}}) K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})}, \quad (2.43)$$

где

$$K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})} = K_{\text{ул}}^{(\text{простр.реж})} K_{\text{ул}}^{(\text{простр.сел})} K_{\text{ул}}^{(\text{поляриз.сел})} K_{\text{ул}}^{(\text{поляриз.реж})} K_{\text{ул}}^{(\text{частотн.реж})} \quad (2.44)$$

- коэффициент улучшения отношения (НС/АП) по мощности средствами помехозащиты (ПЗ), имеющимися в составе НАП.

В случае наличия в составе НАП устройства ПЗ, включенного перед приемником, при определении коэффициента подавления  $K_{\text{под.НАП}}$  ( $\text{ПК}_{\text{под}}$ ) в (2.43) необходимо учесть, что, поскольку входом приемника НАП является выход устройства ПЗ, наряду с СШ на входе этого приемника присутствует дополнительная шумовая составляющая в виде СШ устройства ПЗ.

Если устройство ПЗ представляет собой линейное устройство, как это обычно имеет место в устройствах пространственной и пространственно-временной обработки на базе ААР, то мощность дополнительной шумовой составляющей

$$P_{\text{ш. дополн}} = P_{\text{СШ вх УПЗ}} K_{\text{пер.ш}}^{(\text{УПЗ})},$$

где  $P_{\text{СШ вх УПЗ}}$  – мощность СШ устройства ПЗ, приведенная к его входу (в случае, когда устройство ПЗ представляет собой пространственный режекторный фильтр – компенсатор на базе ААР, то это мощность СШ на входе приемника (выходе АЭ) основного канала компенсатора);

$K_{\text{пер.ш}}^{(\text{УПЗ})}$  - коэффициент передачи устройства ПЗ по шуму (т.н. «коэффициент усиления шума»). Таким образом, на входе приемника НАП действует суммарный шум, мощность которого

$$P_{\text{ш.}\Sigma} = P_{\text{СШ}} + P_{\text{ш. дополн}}.$$

С учетом сказанного, для коэффициента подавления НАП справедливо соотношение

$$K_{\text{под НАП}} (\text{ПК}_{\text{под}}) = \frac{1}{K_{\text{кач.АП}}} \left[ \frac{2 B_{\text{НС}}}{q_{\text{вых.треб}}^2 K_{\text{пот}}} - K_{\text{кач.ш}} q_{\text{ш/НС вх}}^2 - \sum_{i=1}^{N_{\text{ВП}}} q_{\text{ВП}i/\text{НС вх}}^2 K_{\text{кач.ВП}i} \right], \quad (2.45)$$

где  $q_{\text{ш/НС вх}}^2 = \frac{P_{\text{ш.}\Sigma}}{P_{\text{НС вх}}}$ ;

$K_{\text{кач.ш}}$  - коэффициент качества суммарного шума.

Условие подавления, представленное в виде (2.43), учитывает действие на НАП многокомпонентной помехи, а также наличие в составе НАП средств помехозащиты. Это условие представляет интерес с точки зрения практических расчетов и выводов. Однако оно применимо только в случае действия на НАП одиночного точечного постановщика преднамеренной АП.

### 2.3.2.2 Коллективное подавление НАП в пределах ПНПР

Постановщики АП, участвующие в формировании ПНПР, размещаются на местности (в пространстве над местностью) некоторым целесообразным образом. При этом НАП, находящаяся на защищаемой территории (над территорией), подвергается, как правило, одновременно воздействию нескольких ПАП. Очевидно, что при анализе и расчетах следует учитывать лишь те ПАП из состава ПНПР, которые имеют радиовидимость с носителем НАП.

Предположим, что в текущий момент времени число ПАП, действующих на НАП, равно  $N_{\text{ПАП}} > 1$ . Тогда суммарная мощность АП на входе приемника НАП

$$P_{\text{АП вх}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{ПАП}}} P_{\text{АП}_i \text{ вх}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{ПАП}}} (\text{ППМ}_{\text{АП}_i}^{\text{НАП}} S_{\text{НАП}}^{\text{ПАП}_i} \gamma_{\text{НАП}}^{\text{ПАП}_i}),$$

где  $P_{\text{АП}_i \text{ вх}}$  – мощность  $i$ -го компонента суммарной АП (создаваемого  $i$ -м ПАП) на входе НАП;  $\text{ППМ}_{\text{АП}_i}^{\text{НАП}}$  – плотность потока мощности поля АП, создаваемого ПАП $_i$ , в точке расположения носителя НАП;

$S_{\text{НАП}}^{\text{ПАП}_i}$  – эффективная площадь антенны НАП в направлении ПАП $_i$ ;

$\gamma_{\text{НАП}}^{\text{ПАП}_i} \leq 1$  – коэффициент поляризационных потерь, учитывающий рассогласование поляризации антенн НАП и ПАП $_i$ .

С учетом этого условие подавления НАП – аналог (2.32) для случая коллективного подавления НАП принимает вид:

$$q_{\text{АП/НС вх}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{ПАП}}} (\text{ППМ}_{\text{АП}_i}^{\text{НАП}} G_{\text{НАП}}^{\text{ПАП}_i} \gamma_{\text{НАП}}^{\text{ПАП}_i})}{\text{ППМ}_{\text{НС}}^{\text{НАП}} G_{\text{НАП}}^{\text{НС3}} \gamma_{\text{НАП}}^{\text{НС3}}} \geq K_{\text{под.НАП}} (\text{ПК}_{\text{под}}). \quad (2.46)$$

Рассматривая левую часть соотношения (2.46), замечаем следующее.

Множители  $G_{\text{НАП}}^{\text{ПАП}_i} / G_{\text{НАП}}^{\text{НС3}}$  представляют собой величины, обратные коэффициентам улучшения  $K_{\text{ул.}i}^{(\text{простр.обр})}$  отношения  $(P_{\text{НС вх}} / P_{\text{АП}_i \text{ вх}})$  средствами пространственной обработки сигналов (пространственной режекции АП $_i$  и пространственной селекции НС), действующими в составе НАП,  $i=1,2,\dots,N_{\text{ПАП}}$ . Аналогично представлению (2.44) справедливо:

$$K_{\text{ул.}i}^{(\text{простр.обр})} = K_{\text{ул.}i}^{(\text{простр.сел})} K_{\text{ул.}i}^{(\text{простр.реж})} = \frac{G_{\text{НАП}}^{\text{ПАП}_i}}{G_{\text{НАП}}^{\text{НС3}}} = K_{\text{пер.НС}}^{(\text{АР})} K_{\text{осл.АП}_i}^{(\text{АР})} \frac{G_{\text{АЭ}}^{\text{НС3}}}{G_{\text{АЭ}}^{\text{ПАП}_i}} = \frac{K_{\text{пер.НС}}^{(\text{АР})}}{K_{\text{пер.АП}_i}^{(\text{АР})}} \frac{G_{\text{АЭ}}^{\text{НС3}}}{G_{\text{АЭ}}^{\text{ПАП}_i}}, \quad (2.47)$$

где

$$K_{\text{ул.}i}^{(\text{простр.реж})} = \frac{\left( \frac{P_{\text{НС вх}}}{P_{\text{АП}_i \text{ вх}}} \right)_{\text{при наличии простр. реж}}}{\left( \frac{P_{\text{НС вх}}}{P_{\text{АП}_i \text{ вх}}} \right)_{\text{при отсутствии простр. реж}}} = \frac{1}{G_{\text{НАП}}^{\text{ПАП}_i}} \quad (2.48)$$

- коэффициент улучшения отношения  $(P_{\text{НС вх}} / P_{\text{АП}_i \text{ вх}})$  средствами пространственной режекции;

Множители  $\gamma_{\text{НАП}}^{\text{ПАП}_i} / \gamma_{\text{НАП}}^{\text{НС3}}$  учитывают влияние средств поляризационной обработки сигналов, имеющих в составе НАП, а также влияние рассогласования поляризации антенн НАП, НС3 и ПАП $_i$  на величину  $P_{\text{АП}_i \text{ вх}} / P_{\text{НС вх}}$ ,  $i=1,2,\dots,N_{\text{ПАП}}$ . Величина, обратная множителю  $\gamma_{\text{НАП}}^{\text{ПАП}_i} / \gamma_{\text{НАП}}^{\text{НС3}}$ ,



представляет собой коэффициент улучшения отношения  $P_{\text{НС вх}}/P_{\text{АП } i \text{ вх}}$  средствами поляризационной обработки сигналов, имеющимися в составе НАП:

$$K_{\text{ул.}i}^{(\text{поляриз.обр})} = \frac{\left( \frac{P_{\text{НС вх}}/P_{\text{АП } i \text{ вх}}}{\text{при наличии поляриз. обр.}} \right)}{\left( \frac{P_{\text{НС вх}}/P_{\text{АП } i \text{ вх}}}{\text{при отсутствии поляриз. обр.}} \right)}. \quad (2.49)$$

Аналогично рассмотренному выше, в случае реализации в составе НАП средств поляризационной обработки НС и АП справедливо:

$$K_{\text{ул.}i}^{(\text{поляриз.обр})} = K_{\text{ул.}i}^{(\text{поляриз.сел})} K_{\text{ул}}^{(\text{поляриз.реж})} = \gamma_{\text{НАП}}^{\text{НСЗ}} / \gamma_{\text{НАП}}^{\text{ПАП } i}. \quad (2.50)$$

Наряду со средствами ПЗ, связанными с антенной, в составе приемника НАП могут также содержаться средства частотной режекции АП. Назначение этих средств - увеличение отношения  $P_{\text{НС вх}}/P_{\text{АП } i \text{ вх}}$ ,  $i=1,2,\dots,N_{\text{ПАП}}$  в приемном тракте НАП. Характеристикой эффективности частотной режекции АП<sub>*i*</sub> является коэффициент улучшения отношения ( $P_{\text{НС вх}}/P_{\text{АП } i \text{ вх}}$ )

$$\begin{aligned} K_{\text{ул.}i}^{(\text{частотн.реж})} &= \frac{\left( \frac{P_{\text{НС вх}}/P_{\text{АП } i \text{ вх}}}{\text{при наличии частотн. реж.}} \right)}{\left( \frac{P_{\text{НС вх}}/P_{\text{АП } i \text{ вх}}}{\text{при отсутствии частотн. реж.}} \right)} = \frac{P_{\text{НС вх ЧРФ}}}{P_{\text{НС вх}}} \times \frac{P_{\text{АП } i \text{ вх ЧРФ}}}{P_{\text{АП } i \text{ вх}}} = \\ &= K_{\text{пер НС}}^{(\text{ЧРФ})} K_{\text{осл АП } i}^{(\text{ЧРФ})} = \frac{K_{\text{пер НС}}^{(\text{ЧРФ})}}{K_{\text{пер АП } i}^{(\text{ЧРФ})}}, \end{aligned} \quad (2.51)$$

где  $P_{\text{НС вх ЧРФ}}$  и  $P_{\text{АП } i \text{ вх ЧРФ}}$  - мощность НС рабочего НСЗ и помехи АП *i* на входе частотного режекторного фильтра (ЧРФ);

$P_{\text{НС вх}}/P_{\text{АП } i \text{ вх}}$  и  $P_{\text{АП } i \text{ вх ЧРФ}}$  - мощность НС и помехи АП<sub>*i*</sub> на выходе ЧРФ.

С учетом (2.47), (2.49), ... (2.51) условие подавления НАП совокупностью ПАП, действующих в составе ПНПР, с учетом средств ПЗ, имеющихся в составе НАП, имеет вид:

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{ПАП}}} \left( \frac{\text{ППМ}_{\text{АП } i}^{\text{НАП}}}{\text{ППМ}_{\text{НС}}^{\text{НАП}} K_{\text{ул.}i}^{(\text{ПЗ})}} \right) \geq K_{\text{под НАП}} (\text{ПК}_{\text{под}}), \quad (2.52)$$

где

$$K_{\text{ул.}i}^{(\text{ПЗ})} = K_{\text{ул.}i}^{(\text{простр.реж})} K_{\text{ул.}i}^{(\text{простр.сел})} K_{\text{ул.}i}^{(\text{поляриз.сел})} K_{\text{ул}}^{(\text{поляриз.реж})} K_{\text{ул.}i}^{(\text{частотн.реж})}, \quad (2.53)$$

коэффициент, учитывающий действие имеющихся в составе НАП средств ПЗ от *i*-ого ПАП.

Далее будем исходить из предположения, что имеющиеся в составе НАП средства помехозащиты одинаково эффективны по отношению ко всем ПАП<sub>*i*</sub>,  $i = 1, 2, \dots, N_{\text{ПАП}}$ , то есть,  $K_{\text{ул.}1}^{(\text{ПЗ})} =$

$K_{\text{ул.}2}^{(\text{ПЗ})} = \dots = K_{\text{ул.}N_{\text{ПАП}}}^{(\text{ПЗ})} = K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})}$ . С учетом этого предположения условие подавления (2.43) представим в виде

$$\frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{ПАП}}} \text{ППМ}_{\text{АП } i}^{\text{НАП}}}{\text{ППМ}_{\text{НС}}^{\text{НАП}}} \geq K_{\text{под.НАП}} (\text{ПК}_{\text{под}}) K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})}, \quad (2.54)$$

где

$$K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})} = K_{\text{ул}}^{(\text{простр.реж})} K_{\text{ул}}^{(\text{простр.сел})} K_{\text{ул}}^{(\text{поляриз.сел})} K_{\text{ул}}^{(\text{частотн.реж})} \quad (2.55)$$

- коэффициент улучшения отношения (НС/АП) по мощности средствами ПЗ НАП, совпадающий, благодаря сделанному выше предположению, с (2.54). Коэффициент подавления  $K_{\text{под}}(\text{ПК}_{\text{под}})$  в (2.54), по-прежнему, определяется соотношением (2.45).

Условие подавления НАП, определяемое соотношениями (2.52), (2.54), обобщает аналогичное условие (2.43) на случай коллективного подавления НАП группой из  $N_{\text{ПАП}}$  точечных ПАП, действующих в составе ПНПР.

Полученные условия (2.43), (2.52), (2.54) позволяют задавать требования к величине плотности потока мощности поля радиопомех в пределах ПНПР. С учетом (2.45) представим соотношение (2.43) в виде:

$$q_{\text{ППМ}}^2 \geq \frac{1}{K_{\text{кач.АП}}} \left[ \frac{2 B_{\text{НС}}}{q_{\text{вых.треб}}^2 K_{\text{пот}}} - K_{\text{кач.ш}} q_{\text{ш/НС вх}}^2 - \sum_{i=1}^{N_{\text{ВП}}} q_{\text{ВП}i/\text{НС вх}}^2 K_{\text{кач.ВП}i} \right] K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})}, \quad (2.56)$$

где

$$q_{\text{ППМ}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{ПАП}}} \text{ППМ}_{\text{АП}i}^{\text{НАП}}}{\text{ППМ}_{\text{НС}}^{\text{НАП}}}$$

- отношение плотности потока мощности (ППМ) суммарной помехи, создаваемой в точке расположения НАП всеми ПАП из состава ПНПР, к ППМ рабочего НС;

$q_{\text{вых.треб}}^2 = q_{\text{вых}}^2(\text{ПК}_{\text{под}})$  значение отношения (НС/(суммарная помеха)) на выходе коррелятора НАП, при котором обеспечивается требуемый уровень  $\text{ПК}_{\text{под}}$ .

На рисунках 2.31 представлены семейства графиков зависимости требуемого уровня величины  $q_{\text{ППМ.треб}}^2$  от параметра  $q_{\text{вых.треб}}^2$  при различных значениях коэффициента улучшения  $K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})}$ . При расчетах принято, что влияние внутрисистемной помехи пренебрежимо мало,  $K_{\text{кач.АП}}=K_{\text{кач.ш}}=1$ ;  $K_{\text{пот}}=1$ ;  $K_{\text{пер.ш}}^{(\text{УПЗ})}=1$ . Величина коэффициента улучшения  $K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})}$  (2.55) варьировалась в пределах (0...60) дБ.

Анализ результатов расчетов позволяет оценить влияние средств ПЗ, имеющихся в составе подавляемой НАП, на величину требуемой ППМ поля радиопомех – важнейшего энергетического параметра ПНПР. В случае, когда помехи от всех ПАП, действующих на НАП, ослабляются средствами ПЗ одинаково, эта величина, согласно (2.56), увеличивается прямо пропорционально коэффициенту улучшения  $K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})}$ . Если различные компоненты суммарной помехи ослабляются неодинаково, то рассматриваемая зависимость более сложная, она может быть построена на основе соотношения (2.52).

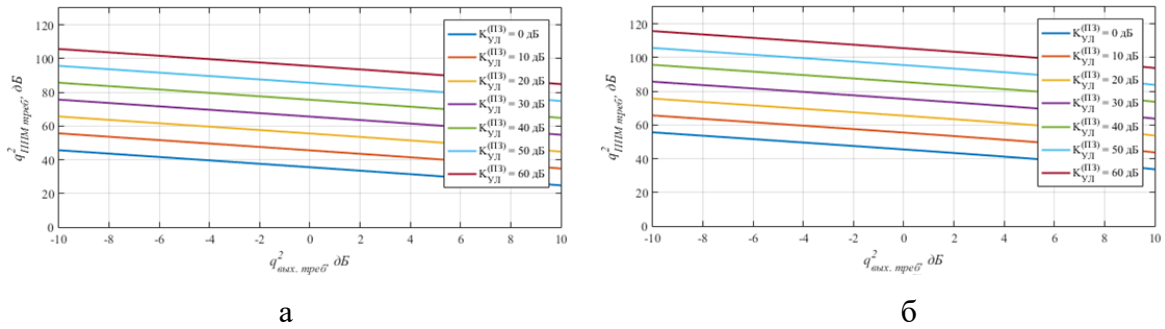


Рисунок 2.31 - Требуемый уровень отношения П/НС по ППМ как функция требуемого отношения НС/АП по мощности: а -  $V_{НС} = 2046$ , б -  $V_{НС} = 20460$

Из рассмотренных методов ПЗ НАП наибольшее значение имеют пространственная (пространственно-временная) режекция АП и селекция рабочих НС. Даже в случае использования в НАП антенны в виде одиночного АЭ, как указано выше, коэффициент улучшения  $K_{ул}^{(простр.обр)}$  по отношению к наземным ПАП может достигать 30 дБ и более за счет целенаправленно снижаемого уровня ДН в направлениях отрицательных углов в вертикальной плоскости и экранирующего действия корпуса ЛА – носителя НАП. При использовании в НАП ААР, способной формировать «провалы» ДН в направлениях ПАП, расположенных относительно носителя НАП как на линии горизонта, так и ниже или выше него, коэффициент улучшения  $K_{ул}^{(простр.обр)}$  по отношению как к воздушным, так и к наземным ПАП, может достигать гораздо больших значений (до 56 дБ [5] и более). Дополнительные возможности подавления преднамеренных помех открываются при реализации в НАП адаптивной поляризационной обработки.

Таким образом, из проведенного рассмотрения следует, что средства ПЗ, применяемые в современных и перспективных образцах НАП СРНС, особенно средства пространственной (пространственно-временной) обработки, резко (на десятки дБ) увеличивают требования к энергетическим параметрам ПНПР. Следует отметить, что реализация таких требований в некоторых случаях может оказаться проблематичной. Значение полученных условий подавления НАП в виде соотношений (2.52), (2.54), (2.56) состоит в том, что они позволяют обосновать требования к энергетике ПАП, действующих в составе ПНПР с учетом наличия в составе подлежащих подавлению образцов НАП современных средств ПЗ. Существенно, что благодаря развитию антенной техники, а также внедрению адаптивных алгоритмов пространственно-временной обработки сигналов, эти требования резко повышаются. Вопросы реализации повышенных требований к энергетике ПНПР составляют в настоящее время актуальную проблему.

## 2.4 Расчетные характеристики противонавигационного поля радиопомех, создаваемого для противодействия навигационной аппаратуре потребителей спутниковых радионавигационных систем

### 2.4.1 Условие радиоподавления навигационной аппаратуры потребителя в пределах противонавигационного поля радиопомех

Условие подавления НАП совокупностью постановщиков активных радиопомех ПАП<sub>*i*</sub>,  $i = 1, 2, \dots, N_{\text{ПАП}}$  из состава ПНПР с учетом действия средств ПЗ, имеющихся в составе НАП, имеет вид (2.52):

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

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 активной радиопомехи АП<sub>*i*</sub>, создаваемой в точке расположения НАП *i*-ым ПАП;  
 $K_{\text{ул.}i}^{(\text{ПЗ})}$  - коэффициент улучшения отношения (НС / (помеха от ПАП<sub>*i*</sub>)) по мощности на входе приемника НАП, средствами ПЗ, имеющимися в составе НАП;  
 $K_{\text{под НАП}}(\text{ПК}_{\text{под}})$  - коэффициент подавления НАП, зависящий от показателя качества подавления  $\text{ПК}_{\text{под}}$ .

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

$$K_{\text{ул.}i}^{(\text{ПЗ})} = K_{\text{ул.}i}^{(\text{простр.реж})} K_{\text{ул.}i}^{(\text{простр.сел})} K_{\text{ул.}i}^{(\text{поляриз.сел})} K_{\text{ул.}i}^{(\text{поляриз.реж})} K_{\text{ул.}i}^{(\text{частотн.реж})}, \quad (2.57)$$

где множители представляют собой соответственно коэффициенты улучшения отношения (НС / (помеха от ПАП<sub>*i*</sub>)) по мощности на входе приемника НАП средствами ПЗ: пространственной режекции ( $K_{\text{ул.}i}^{(\text{простр.реж})}$ ), пространственной селекции ( $K_{\text{ул.}i}^{(\text{простр.сел})}$ ), поляризационной селекции ( $K_{\text{ул.}i}^{(\text{поляриз.сел})}$ ), поляризационной режекции ( $K_{\text{ул.}i}^{(\text{поляриз.реж})}$ ), частотной режекции ( $K_{\text{ул.}i}^{(\text{частотн.реж})}$ ), имеющимися в составе подавляемой НАП ( $i = 1, 2, \dots, N_{\text{ПАП}}$ ).

Соотношение (2.52) позволяет задать требования к основным характеристикам ПНПР. Таковыми характеристиками являются:

- требуемая ППМ поля радиопомех;
- требуемая мощность ПАП, действующих в составе ПНПР, а также одиночных ПАП;
- дальность радиоподавления НАП.

Рассмотрим вопросы определения указанных характеристик.

## 2.4.2 Требуемая плотность потока мощности поля радиопомех в пределах противонавигационного поля радиопомех

Общее соотношение, определяющее плотность АП в точке расположения НАП  $\text{ППМ}_{\text{АП треб}}^{\text{НАП}}$ , при достижении которой обеспечивается радиоподавление НАП с требуемым уровнем  $\text{ПК}_{\text{под}}$ , вытекает непосредственно из (2.52):

$$\text{ППМ}_{\text{АП треб}}^{\text{НАП}} = \left( \sum_{i=1}^{N_{\text{ПАП}}} \frac{\text{ППМ}_{\text{АП } i}^{\text{НАП}}}{K_{\text{ул. } i}^{(\text{ПЗ})}} \right)_{\text{треб}} \geq \text{ППМ}_{\text{НС}}^{\text{НАП}} K_{\text{под НАП}} (\text{ПК}_{\text{под}}), \quad (2.58)$$

где коэффициенты улучшения  $K_{\text{ул. } i}^{(\text{ПЗ})}$  определяются согласно (2.57).

Частный случай условия (2.58), справедливый в предположении, когда все составляющие суммарной АП подавляются средствами ПЗ НАП одинаково, то есть  $K_{\text{ул. } 1}^{(\text{ПЗ})} = K_{\text{ул. } 2}^{(\text{ПЗ})} = \dots = K_{\text{ул. } N_{\text{ПАП}}}^{(\text{ПЗ})} = K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})}$ , имеет вид:

$$\text{ППМ}_{\text{АП треб}}^{\text{НАП}} = \left( \sum_{i=1}^{N_{\text{ПАП}}} \text{ППМ}_{\text{АП } i}^{\text{НАП}} \right)_{\text{треб}} \geq \text{ППМ}_{\text{НС}}^{\text{НАП}} K_{\text{под НАП}} (\text{ПК}_{\text{под}}) K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})}. \quad (2.59)$$

Соотношения (2.58) и (2.59) могут быть использованы в качестве расчетных, если определены значения входящих в них величин. Анализ этих величин позволяет выявить следующее.

1. Величина  $\text{ППМ}_{\text{НС}}^{\text{НАП}}$  (плотность потока мощности НС, излучаемого с борта рабочего НСЗ, в точке расположения НАП), может быть определена применительно к существующим СРНС на основе сведений об интенсивности НС у поверхности Земли, содержащихся в соответствующих интерфейсных контрольных документах СРНС. Обычно приводятся данные о мощности  $P_{\text{НС}}^*$  НС на выходе эталонной антенны (ЭА) с коэффициентом усиления  $G_{\text{ЭА}}$ , расположенной у поверхности Земли, причем НСЗ расположен под определенным углом места. Величины  $\text{ППМ}_{\text{НС}}^{\text{НАП}}$  и  $P_{\text{НС}}^*$  связаны соотношением

$$P_{\text{НС}}^* = \text{ППМ}_{\text{НС}}^{\text{НАП}} S_{\text{ЭА}} \gamma_{\text{ЭА}}^{\text{НС}} = \frac{\text{ППМ}_{\text{НС}}^{\text{НАП}} G_{\text{ЭА}} \lambda^2 \gamma_{\text{ЭА}}^{\text{НС}}}{4\pi},$$

где  $S_{\text{ЭА}}$  – эффективная площадь эталонной антенны;

$\gamma_{\text{ЭА}}^{\text{НС}}$  – коэффициент, учитывающий рассогласование поляризации эталонной антенны и НС.

Отсюда следует, что

$$\text{ППМ}_{\text{НС}}^{\text{НАП}} = \frac{4\pi P_{\text{НС}}^*}{G_{\text{ЭА}} \lambda^2 \gamma_{\text{ЭА}}^{\text{НС}}}. \quad (2.60)$$

Применительно к СРНС GPS уровни мощности  $P_{\text{НС эт}}$  обычно приводятся для случая, когда  $G_{\text{ЭА}} = 3$  дБ, поляризация антенны линейная, угол места прихода НС составляет от 5 до 10 градусов) [31]. В этом случае вместо (2.60) справедливо

$$\text{ППМ}_{\text{НС}}^{\text{НАП}} = \frac{4\pi P_{\text{НС изотр}}}{\lambda^2},$$

где  $P_{\text{НС изотр}}$  - мощность НС на выходе изотропной ЭА.

В таблице 2.13 приведены значения  $\text{ППМ}_{\text{НС}}^{\text{НАП}}$ , рассчитанные на основе (2.59) применительно к СРНС GPS, работающей на частотах 1575,42 МГц ( $\lambda \sim 0,19$  м) и 1227,6 МГц ( $\lambda \sim 0,24$  м). При расчетах принято  $\gamma_{\text{ЭА}}^{\text{НС}} = 0,5$ .

Таблица 2.13 - Плотность потока мощности НС в точке расположения НАП

	С/А		Р(У)	
	$\lambda \sim 0,19$	$\lambda \sim 0,24$	$\lambda \sim 0,19$	$\lambda \sim 0,24$
Длина волны, м	$\lambda \sim 0,19$	$\lambda \sim 0,24$	$\lambda \sim 0,19$	$\lambda \sim 0,24$
$\text{ППМ}_{\text{НС}}^{\text{НАП}}$ , Вт/м <sup>2</sup>	$4.8951 \cdot 10^{-14}$	$2.9722 \cdot 10^{-14}$	$2.4534 \cdot 10^{-14}$	$1.4896 \cdot 10^{-14}$

2. Коэффициент подавления  $K_{\text{под НАП}}(\text{ПК}_{\text{под}})$  определяется соотношением (2.45):

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

где  $B_{\text{НС}} = \tau_{\text{НС}} \Delta f_{\text{НС}}$  - база обрабатываемого в корреляторе НАП фрагмента НС, имеющего длительность  $\tau_{\text{НС}}$  и ширину спектра  $\Delta f_{\text{НС}}$ ;

$q_{\text{ш/НС вх}}^2$  - отношение  $P_{\text{ш вх}}/P_{\text{НС вх}}$  мощности  $P_{\text{ш вх}}$  шума на входе приемника НАП, к мощности  $P_{\text{НС вх}}$  НС на входе этого приемника;

$q_{\text{ВП}i/\text{НС вх}}^2$  - отношение мощности  $P_{\text{ВП}i \text{ вх}}$   $i$ -ого компонента ВП на входе приемника НАП к мощности  $P_{\text{НС вх}}$  НС на входе приемника;

$N_{\text{ВП}}$  - количество компонентов ВП, действующих на входе приемника;

$q_{\text{вых. треб}}^2 = q_{\text{вых. треб}}^2(\text{ПК}_{\text{под}})$  - требуемое значение величины отношения мощности НС к суммарной мощности АП, ВП и собственного шума на выходе коррелятора НАП (при котором достигается требуемый уровень показателя качества подавления  $\text{ПК}_{\text{под}}$ )

$$q_{\text{вых}}^2 = \frac{P_{\text{НС вх}}}{P_{(\text{АП}+\text{СШ}+\text{ВП})_{\text{вых}}}};$$

$K_{\text{пот}}$  - коэффициент, учитывающий потери величины выходного ОСП из-за неидеальности построения тракта приема и обработки НС, включая коррелятор;

$K_{\text{кач АП}}$ ,  $K_{\text{кач СШ}}$  и  $K_{\text{кач ВП}i}$  - коэффициенты качества преднамеренной АП, СШ и  $i$ -го компонента ВП соответственно.

Выше в разделе 2.3.1 показано, что влиянием собственного шума и внутрисистемных помех (второе и третье слагаемые в квадратных скобках соотношения (2.45)) в большинстве случаев, представляющих интерес, можно пренебречь, при этом расчет величины  $K_{\text{под НАП}}(\text{ПК}_{\text{под}})$

существенно упрощается.

3. Величина коэффициента улучшения  $K_{ул}^{(ПЗ)}$  отношения (НС / (помеха от ПАП)) по мощности на входе приемника НАП средствами ПЗ НАП зависит от состава этих средств и от их технического совершенства.

На рисунке 2.32 приведены результаты расчета в виде семейства графиков зависимости величины  $ППМ_{АП\text{ треб}}^{НАП}$  от параметров  $q_{\text{вых. треб}}^2$  и  $K_{ул}^{(ПЗ)}$ , выполненных на основе соотношений (2.45) и (2.59) с учетом рассмотренных выше соображений о значениях входящих в эти соотношения параметров. Принято, что  $G_{ЭА} = 2$  (3 дБ),  $\gamma_{ЭА}^{НС} = 0,5$ ,  $\lambda = 0,19$  м,  $P_{НС}^*$  равно минус 158.5 дБ и минус 161.5 дБ для С/А и Р(У) кода соответственно,  $K_{\text{кач. АП}} = 1$ ,  $K_{\text{пот}} = 0.9$  (минус 0.44 дБ),  $B_{НС} = 2046$  и 20460 (для С/А и Р(У) кода соответственно). Сплошные и штриховые линии на графике относятся, соответственно, к сигналам С/А и Р(У).

Для  $q_{\text{вых. треб}}^2 = -9.5$  дБ в режиме слежения за фазой НС (эквивалентная шумовая полоса 20 Гц)  $K_{\text{под. НАП}}(\text{ПК}_{\text{под}}) = 42.2$  и 52.2 дБ для С/А и Р(У) кодов соответственно, при этом  $\text{ПК}_{\text{под}}$  – вероятность срыва слежения за фазой НС  $P_{\text{срыва сл. за фазой}}$ ,  $\tau = 0.95$  за заданное время срыва  $\tau = 1$  с при критериальном параметре  $p = 3$ .

Для  $q_{\text{вых. треб}}^2 = -8.4$  дБ в режиме слежения за фазой НС (эквивалентная шумовая полоса 20 Гц)  $K_{\text{под. НАП}}(\text{ПК}_{\text{под}}) = 41.1$  и 51.1 дБ для С/А и Р(У) кодов соответственно, при этом  $\text{ПК}_{\text{под}}$  – вероятность срыва слежения за фазой НС  $P_{\text{срыва сл. за фазой}}$ ,  $\tau = 0.95$  за заданное время срыва  $\tau = 10$  с и критериальном параметре  $p = 3$ .

Для  $q_{\text{вых. треб}}^2 = -11.5$  дБ в режиме слежения за частотой НС (эквивалентная шумовая полоса 10 Гц)  $K_{\text{под. НАП}}(\text{ПК}_{\text{под}}) = 44.2$  и 54.2 дБ для С/А и Р(У) кодов соответственно, при этом  $\text{ПК}_{\text{под}}$  – вероятность срыва слежения за частотой НС  $P_{\text{срыва сл. за частотой}}$ ,  $\tau = 0.95$  за заданное время срыва  $\tau = 1$  с и критериальном параметре  $p = 3$ .

Для  $q_{\text{вых. треб}}^2 = -10.5$  дБ в режиме слежения за частотой НС (эквивалентная шумовая полоса 10 Гц)  $K_{\text{под. НАП}}(\text{ПК}_{\text{под}}) = 43.2$  и 53.2 дБ для С/А и Р(У) кодов соответственно, при этом  $\text{ПК}_{\text{под}}$  – вероятность срыва слежения за частотой НС  $P_{\text{срыва сл. за частотой}}$ ,  $\tau = 0.95$  за заданное время срыва  $\tau = 10$  с и критериальном параметре  $p = 3$ .

Для  $q_{\text{вых. треб}}^2 = 6.9$  дБ в режиме поиска НС (критерий «5 из 8» при вероятности ложной тревоги  $10^{-5}$ )  $K_{\text{под. НАП}}(\text{ПК}_{\text{под}}) = 28.8$  и 38.8 дБ для С/А и Р(У) кодов соответственно, при этом  $\text{ПК}_{\text{под}}$  – вероятность необнаружения НС  $P_{\text{необн. НС}}$ ,  $\tau = 0.95$  за заданное время  $\tau = 300$  с.

Для  $q_{\text{вых. треб}}^2 = 1.7$  дБ в режиме допоиска НС (критерий «5 из 8» при вероятности ложной тревоги  $10^{-2}$ )  $K_{\text{под. НАП}}(\text{ПК}_{\text{под}}) = 34$  и 44 дБ для С/А и Р(У) кодов соответственно, при этом  $\text{ПК}_{\text{под}}$

– вероятность необнаружения НСЗ  $P_{\text{необн. НСЗ } \tau} = 0.95$  за заданное время  $\tau = 10$  с.

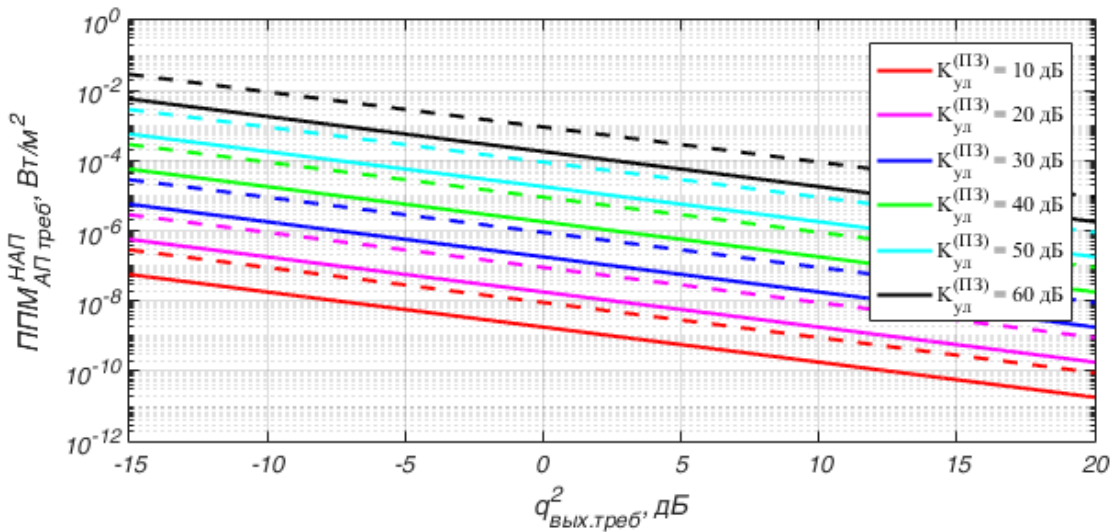


Рисунок 2.32 - Требуемая плотность потока мощности АП в точке расположения НАП в зависимости от  $q^2_{\text{вых. треб}}$

Результаты расчетов демонстрируют сильную зависимость величины  $\text{ППМ}_{\text{АП треб}}^{\text{НАП}}$  от  $q^2_{\text{вых. треб}}$  и параметра  $K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})}$ . Требуемые уровни ППМ помех в точке расположения подавляемой НАП увеличиваются прямо пропорционально величине  $K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})}$ . Например, если показатель качества подавления НАП  $\text{ПК}_{\text{под}} = q^2_{\text{вых. треб}} = 6.9$  дБ (при этом, согласно расчетам выше, обеспечивается в режиме поиска НС (С/А кода) необнаружение НСЗ с вероятностью  $P_{\text{необн. НСЗ } \tau} = 0.95$  за заданное время  $\tau = 300$  с), то уровни  $\text{ППМ}_{\text{АП треб}}^{\text{НАП}}$  составляют  $3.681 \cdot 10^{-10}$  Вт/м<sup>2</sup> (при  $K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})} = 10$  дБ),  $3.681 \cdot 10^{-9}$  Вт/м<sup>2</sup> (при  $K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})} = 20$  дБ),  $3.681 \cdot 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup> (при  $K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})} = 30$  дБ),  $3.681 \cdot 10^{-7}$  Вт/м<sup>2</sup> (при  $K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})} = 40$  дБ),  $3.681 \cdot 10^{-6}$  Вт/м<sup>2</sup> (при  $K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})} = 50$  дБ),  $3.681 \cdot 10^{-5}$  Вт/м<sup>2</sup> (при  $K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})} = 60$  дБ).

#### 2.4.3 Требуемая мощность постановщиков активных помех, действующих в составе противонавигационного поля радиопомех

Постановщики АП, участвующие в создании ПНПР, размещаются на местности (в пространстве над местностью) некоторым целесообразным образом. Поле радиопомех в каждой точке ПНПР образуется как результат суммирования полей, создаваемых отдельными ПАП. При этом, поскольку поля суммируются некогерентно, то мощность АП на входе приемника подавляемой НАП определяется их суммой. Подставляя в (2.52) стандартное соотношение для



$\text{ППМ}_{\text{АП}_i}^{\text{НАП}}$

$$\text{ППМ}_{\text{АП}_i}^{\text{НАП}} = \frac{P_{\text{ПАП}_i} G_{\text{ПАП}_i}^{\text{НАП}}}{4\pi r_{\text{ПАП}_i}^2},$$

получаем условие коллективного подавления НАП, расположенной в пределах ПНПР, в виде

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{ПАП}}} \left( \frac{P_{\text{ПАП}_i} G_{\text{ПАП}_i}^{\text{НАП}}}{4\pi r_{\text{ПАП}_i}^2 K_{\text{УЛ}_i}^{(\text{ПЗ})}} \right) \geq \text{ППМ}_{\text{НС}}^{\text{НАП}} K_{\text{под,НАП}}(\text{ПК}_{\text{под}}), \quad (2.61)$$

где  $P_{\text{ПАП}_i}$  - мощность ПАП<sub>*i*</sub>;

$G_{\text{ПАП}_i}^{\text{НАП}}$  - коэффициент усиления антенны ПАП<sub>*i*</sub> в направлении НАП;

$r_{\text{ПАП}_i}^{\text{НАП}}$  - расстояние между ПАП<sub>*i*</sub> и НАП.

Отметим, что это соотношение (как и все получаемые из него ниже) не учитывает влияние подстилающей поверхности и атмосферы на распространение поля АП на трассах «ПАП<sub>*i*</sub> - НАП»,  $i=1,2,\dots,N_{\text{ПАП}}$ .

Далее будем исходить из предположения, что мощности всех ПАП, формирующих ПНПР в точке расположения НАП, одинаковы. С учетом этого предположения для требуемой мощности единичного ПАП из состава ПНПР на основе соотношения (2.61) получаем:

$$P_{\text{ПАП треб}} \geq \frac{\text{ППМ}_{\text{НС}}^{\text{НАП}} K_{\text{под,НАП}}(\text{ПК}_{\text{под}})}{\sum_{i=1}^{N_{\text{ПАП}}} \left( \frac{G_{\text{ПАП}_i}^{\text{НАП}}}{4\pi r_{\text{ПАП}_i}^2 K_{\text{УЛ}_i}^{(\text{ПЗ})}} \right)}. \quad (2.62)$$

С учетом (2.60) это соотношение принимает вид:

$$P_{\text{ПАП треб}} \geq \frac{P_{\text{НС}}^*}{G_{\text{ЭА}} \gamma_{\text{ЭА}}^{\text{НС}} \lambda^2} \frac{K_{\text{под,НАП}}(\text{ПК}_{\text{под}})}{\sum_{i=1}^{N_{\text{ПАП}}} \left( \frac{G_{\text{ПАП}_i}^{\text{НАП}}}{16\pi^2 r_{\text{ПАП}_i}^2 K_{\text{УЛ}_i}^{(\text{ПЗ})}} \right)}. \quad (2.63)$$

Если предположить, что величины  $K_{\text{УЛ}_i}^{(\text{ПЗ})}$  и  $G_{\text{ПАП}_i}^{\text{НАП}}$  одинаковы для всех ПАП<sub>*i*</sub>,  $i=1,2,\dots,N_{\text{ПАП}}$  и равны, соответственно,  $K_{\text{УЛ}}^{(\text{ПЗ})}$  и  $G_{\text{ПАП}}^{\text{НАП}}$ , то вместо (2.63) получаем

$$P_{\text{ПАП треб}} \geq \frac{P_{\text{НС}}^*}{G_{\text{ЭА}} \gamma_{\text{ЭА}}^{\text{НС}} \lambda^2} \frac{16\pi^2 K_{\text{УЛ}}^{(\text{ПЗ})} K_{\text{под,НАП}}(\text{ПК}_{\text{под}})}{\rho G_{\text{ПАП}}^{\text{НАП}}}, \quad (2.64)$$

где

$$\rho = \sum_{i=1}^{N_{\text{ПАП}}} \left[ \frac{1}{r_{\text{ПАП}_i}^2} \right] \quad (2.65)$$

- величина, определяемая геометрией расстановки ПАП на местности - «параметр расстановки ПАП».

Если эталонная антенна изотропная и согласована по поляризации с НС, то  $P_{\text{НС}}^* = P_{\text{НС изотр}}$ , и вместо (2.63) справедливо:

$$P_{\text{ПАП треб}} \geq \frac{P_{\text{НС изотр}}}{\lambda^2} \frac{16 \pi^2 K_{\text{УЛ}}^{(\text{ПЗ})} K_{\text{под НАП}} (\text{ПК}_{\text{под}})}{\rho G_{\text{ПАП}}^{\text{НАП}}} \quad (2.66)$$

Полученные соотношения (2.62), (2.63), (2.64), (2.66) могут быть использованы в качестве расчетных. При этом формулы (2.64) и (2.66) ввиду их относительной простоты полезны совместно с (2.65) при ручных расчетах.

На рисунках 2.34 приведены семейства графиков зависимости  $P_{\text{ПАП треб}}$  от параметров  $q_{\text{вых.треб}}^2$  и  $K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})}$ , построенной на основе (2.31) и (2.64) для случая радиоподавления НАП СРНС GPS. Принято, что  $G_{\text{ДЭ}} = 2$  (3 дБ),  $\gamma_{\text{ЭА}}^{\text{НС}} = 0,5$ ,  $\lambda = 0,19$  м,  $P_{\text{НС}}$  равно минус 158.5 и минус 161.5 дБ для С/А и Р(У) кода соответственно,  $K_{\text{кач.АП}} = 1$ ,  $K_{\text{пот}} = 0,9$ ,  $B_{\text{НС}} = 2046$  и 20460 (для С/А и Р(У) кода соответственно). Сплошные и штриховые линии на графиках относятся, соответственно, к кодам С/А и Р(У).

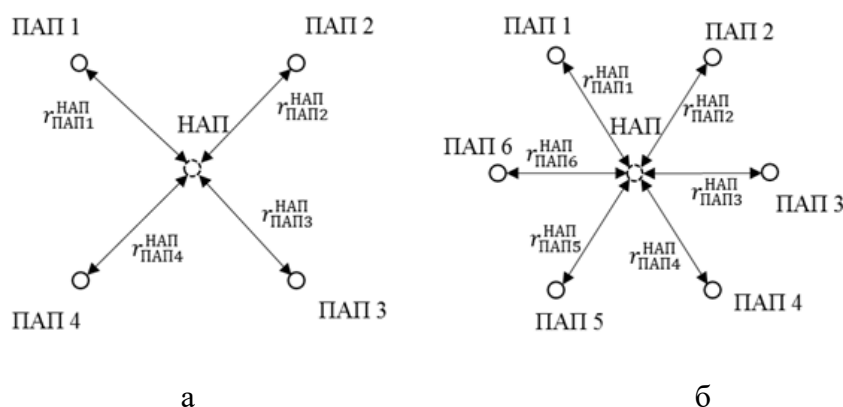


Рисунок 2.33 - Варианты расстановки ПАП на местности: а - расстановка вида «квадрат», б - расстановка вида «шестиугольник»

Расчеты выполнены применительно к варианту расстановки ПАП на местности, соответствующему рисунку 2.33 (а), где  $N_{\text{ПАП}} = 4$ , подавляемая НАП расположена в центре квадрата, в вершинах которого расположены ПАП. Расстояния между подавляемой НАП и всеми ПАП одинаковы и равны  $r_{\text{ПАП}}^{\text{НАП}}$ . Усиление антенн всех ПАП в направлении НАП одинаково и принято  $G_{\text{ПАП}}^{\text{НАП}} = 10$ .

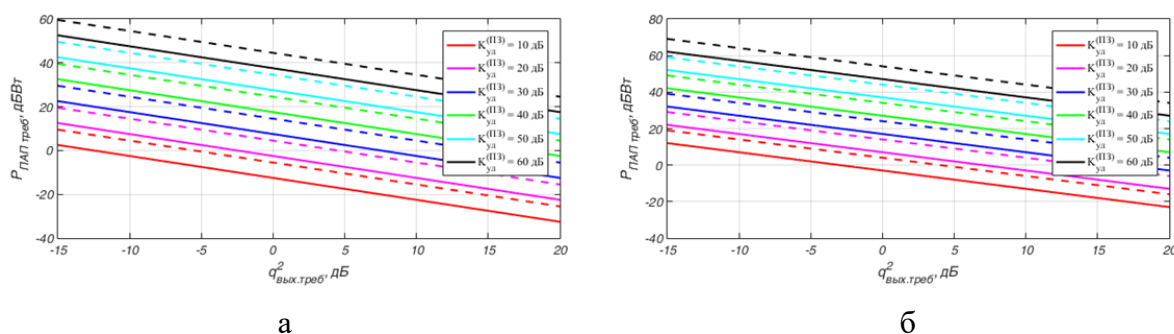


Рисунок 2.34 - Зависимости  $P_{\text{ПАП}}^{\text{треб}}$  от параметров  $q_{\text{вых.треб}}^2$  и  $K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})}$ :

а -  $r_{\text{ПАП}}^{\text{НАП}} = 10000$  м, б -  $r_{\text{ПАП}}^{\text{НАП}} = 30000$  м

Анализ результатов расчетов позволяет заключить, что основными факторами, определяющими требуемую для подавления НАП мощность  $P_{\text{ПАП}}^{\text{треб}}$ , являются расстановка ПАП на местности, а также величины  $q_{\text{вых.треб}}^2$  и  $K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})}$ . При заданной расстановке ПАП (вида «квадрат», «шестиугольник» (рисунок 2.33 (б)) или иной) и определенном исходя из требуемого уровня ПК<sub>под</sub> значения  $q_{\text{вых.треб}}^2$  величина  $P_{\text{ПАП}}^{\text{треб}}$  определяется эффективностью средств ПЗ, имеющих в распоряжении подавляемой НАП. А именно, величина  $P_{\text{ПАП}}^{\text{треб}}$ , как и величина  $\text{ППМ}_{\text{АП}}^{\text{НАП}}^{\text{треб}}$  (смотри выше) увеличивается прямо пропорционально увеличению  $K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})}$ .

Значения  $P_{\text{ПАП}}^{\text{треб}}$  для варианта расстановки ПАП на местности типа «квадрат» и параметров расчета при различных значениях  $q_{\text{вых.треб}}^2$  (ПК<sub>под</sub>) и  $K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})}$  сведены в таблицу 2.14 для  $r_{\text{ПАП}}^{\text{НАП}} = 30000$  м

Таблица 2.14 - Значения требуемой мощности ПАП (дБВт) при  $r_{\text{ПАП}}^{\text{НАП}} = 30000$  м

ПК <sub>под</sub>	$q_{\text{вых.треб}}^2$ , дБ	Тип НС	$K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})}$ , дБ					
			10	20	30	40	50	60
$P_{\text{необн. НС3}} \tau = 0.95$ за заданное время $\tau = 300$ с в режиме поиска	6.9	С/А	-9.83	0.17	10.17	20.17	30.17	40.17
		Р(У)	-2.83	7.17	17.17	27.17	37.17	47.17
$P_{\text{необн. НС3}} \tau = 0.95$ за заданное время $\tau = 10$ с в режиме допоиска	1.7	С/А	-4.63	5.37	15.37	25.37	35.37	45.37
		Р(У)	2.37	12.37	22.37	32.37	42.37	52.37
$P_{\text{срыва слез.за частотой,}} \tau = 0.95$ за время срыва $\tau = 1$ с	-11.5	С/А	8.57	18.57	28.57	38.57	48.57	58.57
		Р(У)	15.57	25.57	35.57	45.57	55.57	65.57

ПК <sub>под</sub>	$q_{\text{вых. треб.}}^2$ дБ	Тип НС	$K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})}$ , дБ					
			10	20	30	40	50	60
$P_{\text{срыва слез.за частотой, } \tau = 0.95}$ за время срыва $\tau = 10$ с	-10.5	C/A	7.57	17.57	27.57	37.57	47.57	57.57
		P(Y)	14.57	24.57	34.57	44.57	54.57	64.57
$P_{\text{срыва слез.за фазой, } \tau = 0.95}$ за время срыва $\tau = 1$ с	-9.5	C/A	6.57	16.57	26.57	36.57	46.57	56.57
		P(Y)	13.57	23.57	33.57	43.57	53.57	63.57
$P_{\text{срыва слез.за фазой, } \tau = 0.95}$ за время срыва $\tau = 10$ с	-8.4	C/A	5.47	15.47	25.47	35.47	45.47	55.47
		P(Y)	12.47	22.47	32.47	42.47	52.47	62.47

#### 2.4.4 Требуемая мощность одиночного постановщика активных помех и дальность подавления навигационной аппаратуры потребителей

Требуемая мощность одиночного ПАП. Мощность одиночного ПАП, требуемая для подавления НАП при заданном расстоянии  $r_{\text{ПАП НАП}}$  между ПАП и НАП, может быть определена на основе соотношений (2.62), (2.63), (2.64) с учетом того, что в данном случае  $N_{\text{ПАП}} = 1$ . В частности, используя (2.64), получаем:

$$P_{\text{ПАП треб}} \geq \frac{P_{\text{НС}}^*}{G_{\text{ЭА}} \gamma_{\text{ЭА}}^{\text{НС}} \lambda^2} \frac{16 \pi^2 r_{\text{ПАП НАП}}^2 K_{\text{под.НАП}}(\text{ПК}_{\text{под}}) K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})}}{G_{\text{ПАП}}^{\text{НАП}}}. \quad (2.67)$$

На рисунке 2.35 представлены семейства графиков зависимости величины  $P_{\text{ПАП треб}}$  от расстояния  $r_{\text{ПАП НАП}}$  и коэффициента улучшения  $K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})}$  при различных значениях присутствующих в (2.67) параметров. Принято, что  $G_{\text{ЭА}} = 2$  (3 дБ),  $\gamma_{\text{ЭА}}^{\text{НС}} = 0,5$ ,  $\lambda = 0,19$  м,  $K_{\text{кач.АП}} = 1$ ,  $K_{\text{пот}} = 0,9$ ,  $P_{\text{НС}}^*$  равно минус 158.5 дБ и минус 161.5 дБ для C/A и P(Y) кода соответственно,  $K_{\text{под.НАП}}(\text{ПК}_{\text{под}}) = 42.2$  и 52.2 дБ для C/A и P(Y) кода соответственно ( $q_{\text{вых. треб}}^2 = -9.5$  дБ при этом  $P_{\text{срыва слез.за фазой, } \tau = 0.95}$ , время срыва  $\tau = 1$  с). Сплошные и штриховые линии относятся, соответственно, к C/A и P(Y) кодам.

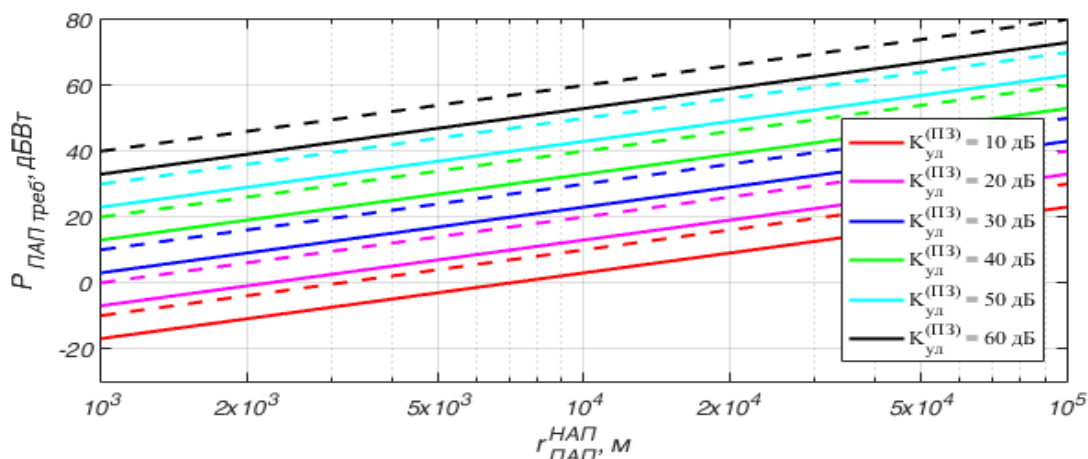


Рисунок 2.35 - Требуемая мощность одиночного ПАП для радиоподавления НАП в режиме слежения за фазой НС

Как и в рассмотренных выше случаях коллективного подавления НАП, главным фактором, определяющим требуемую мощность ПАП, наряду с расстоянием  $r_{\text{ПАП}}^{\text{НАП}}$  и коэффициентом подавления  $K_{\text{под,НАП}}(\text{ПК}_{\text{под}})$ , является коэффициент улучшения  $K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})}$ , обеспечиваемый средствами ПЗ НАП. По-прежнему, при любом расстоянии  $r_{\text{ПАП}}^{\text{НАП}}$  требуемая мощность ПАП растет пропорционально величине  $K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})}$ . Так, если  $r_{\text{ПАП}}^{\text{НАП}} = 10$  км, то величина  $P_{\text{ПАП}}^{\text{треб}}$  для радиоподавления Р(У) кода составляет: 10 Вт ( $K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})} = 10$  дБ), 100 Вт ( $K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})} = 20$  дБ), 1 кВт ( $K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})} = 30$  дБ), 10 кВт ( $K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})} = 40$  дБ), 100 кВт ( $K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})} = 50$  дБ). Если подавляемая НАП оснащена высокоэффективными средствами ПЗ, обеспечивающими  $K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})}$  на уровнях (30...40) дБ и выше, то ее подавление может оказаться проблематичным даже при относительно небольших расстояниях  $r_{\text{ПАП}}^{\text{НАП}}$ .

*Дальность подавления НАП одиночным ПАП.* Расстояние  $r_{\text{ПАП}}^{\text{НАП}}^{\text{подавл}}$  между ПАП и НАП, при котором одиночный ПАП, располагающий мощностью  $P_{\text{ПАП}}$ , обеспечивает подавление НАП с заданным уровнем  $\text{ПК}_{\text{под}}$ , определяется соотношением

$$r_{\text{ПАП}}^{\text{НАП}}^{\text{подавл}} \leq \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{G_{\text{ЭАУЭА}}^{\text{НС}}}{P_{\text{НС}}^*} \frac{P_{\text{ПАП}} G_{\text{ПАП}}^{\text{НАП}} \lambda^2}{K_{\text{под,НАП}}(\text{ПК}_{\text{под}}) K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})}}, \quad (2.68)$$

вытекающим непосредственно из (2.61) с учетом (2.60) при  $N_{\text{ПАП}} = 1$ . Если эталонная антенна изотропная, то вместо (2.67) имеем:

$$r_{\text{ПАП}}^{\text{НАП}}^{\text{подавл}} \leq \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{1}{P_{\text{НС}}^{\text{изотр}}} \frac{P_{\text{ПАП}} G_{\text{ПАП}}^{\text{НАП}} \lambda^2}{K_{\text{под,НАП}}(\text{ПК}_{\text{под}}) K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})}}, \quad (2.69)$$

На рисунке 2.36 представлены семейства графиков зависимости величины  $r_{\text{ПАП}}^{\text{НАП}}^{\text{подавл}}$  от

мощности ПАП  $P_{\text{ПАП}}$  и коэффициента улучшения  $K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})}$  при различных значениях присутствующих в (2.69) параметров. При расчетах принято, что  $G_{\text{ЭА}} = 2$  (3 дБ),  $\gamma_{\text{ЭА}}^{\text{НС}} = 0,5$ ,  $\lambda = 0,19$  м,  $K_{\text{кач.АП}} = 1$ ,  $K_{\text{пот}} = 0,9$ ,  $P_{\text{НС}}^*$  равно минус 158.5 дБ и минус 161.5 дБ для С/А и Р(У) кода соответственно,  $K_{\text{под НАП}}(\text{ПК}_{\text{под}}) = 42.2$  и 52.2 дБ для С/А и Р(У) кода соответственно ( $q_{\text{вых. треб}}^2 = -9.5$  дБ при этом  $P_{\text{срыва слез.за фазой}}$ ,  $\tau = 0.95$ , время срыва  $\tau = 1$  с). Сплошные и штриховые линии относятся, соответственно, к кодам С/А и Р(У).

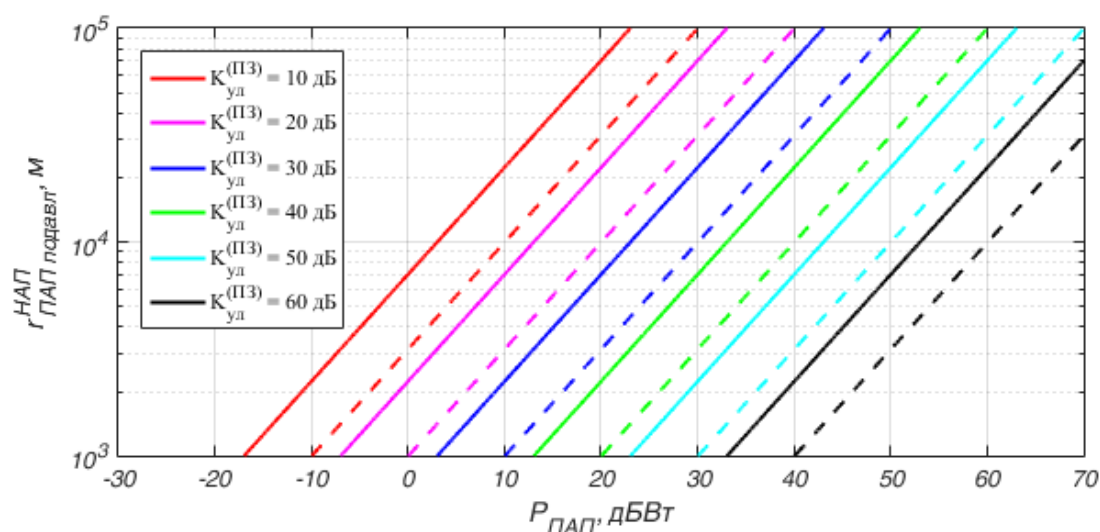


Рисунок 2.36 - Дальность радиоподавления НАП одиночным ПАП в режиме слежения за фазой НС

Анализ графиков показывает, что, как и следовало ожидать, действие средств ПЗ оказывает сильное влияние на дальность подавления НАП. При значениях  $K_{\text{ул}}^{(\text{ПЗ})}$  (30...40) дБ и более расстояния до НАП, при которых обеспечивается подавление НАП одиночным ПАП, относительно невелики даже при высоких уровнях мощности ПАП.

## 2.5 Выводы по главе 2

1. Создание ПНПР в интересах объектово-территориальной защиты возможно на основе способа, предполагающего наличие пространственно-распределенной системы постановщиков радиопомех маскирующего действия, распределенных некоторым целесообразным образом с учетом специфики средств ПЗ НАП СРНС.

2. При исследовании возможностей противодействия НАП СРНС средствами радиоподав-

ления путем воздействия преднамеренными радиопомехами необходимым этапом является выявление условий, при выполнении которых НАП может считаться подавленной (условий радиоподавления НАП). Условия радиоподавления НАП должны быть сформулированы с учетом всех основных факторов, влияющих на организацию радиоподавления.

Возможности радиоподавления НАП определяются следующими факторами:

- а) состав средств ПЗ, имеющихся в распоряжении подавляемой НАП;
- б) предполагаемые способы организации радиоподавления НАП (подавление одиночным ПАП или коллективное подавление);
- в) режим функционирования подавляемой НАП (поиск НС рабочего НСЗ, обнаружение НСЗ, слежение за параметрами НС и др.).

3. Качество радиоподавления НАП целесообразно оценивать следующими показателями:

- а) величина ОСП на выходе коррелятора НАП  $q_{\text{ВЫХ}}^2$ ;
- б) вероятность  $P_{\text{необн. НСЗ } \tau}$  предотвращения обнаружения НСЗ в течение заданного времени  $\tau$ ;
- в) времени  $\tau_{\text{необн.НСЗ,Р}^*}$  предотвращения обнаружения НСЗ с заданной вероятностью  $P^*$ ;
- г) вероятность  $P_{\text{срыва сопр. НСЗ } \tau}$  срыва сопровождения рабочего НСЗ за заданное время  $\tau$ ;
- д) время  $\tau_{\text{срыва сопр.НСЗ,Р}^*}$  от момента начала действия помехи, за которое с заданной вероятностью  $P^*$  обеспечивается срыв сопровождения НСЗ;
- е) вероятность  $P_{\text{срыва слеж.}\tau}$  срыва слежения за фазой, несущей частотой и задержкой кода НС в течение заданного времени  $\tau$ ;
- ж) время  $\tau_{\text{срыва слеж.Р}^*}$ , требуемое для срыва слежения за фазой, несущей частотой и задержкой кода НС с заданной вероятностью  $P^*$ .

Все указанные показатели однозначно связаны с величиной  $q_{\text{ВЫХ}}^2$ .

4. Защита современных и перспективных образцов НАП от преднамеренных АП организуется с использованием ААР и алгоритмов пространственно-временной обработки сигналов. На базе ААР реализуется адаптивная пространственная режекция источников помех и селекция полезных НС.

Показателем эффективности адаптивной пространственной режекции АП и селекции НС является коэффициент улучшения отношения (НС/АП) на выходе ААР. По опубликованным данным величина коэффициента улучшения при использовании 4-х элементной ААР может достигать 56 дБ.

5. Условие радиоподавления НАП преднамеренными АП формулируется в виде соотношения (2.31), (2.52). Оно учитывает действие основных факторов, определяющих эффективность радиоподавления НАП:

- наличие в составе подавляемой НАП средств помехозащиты, в том числе на базе ААР;
- возможность коллективного подавления НАП группой распределенных в пространстве постановщиков АП;
- функционирования подавляемой НАП в различных рабочих режимах.

6. Требуемая мощность ПАП, работающего в составе пространственно- распределенной группы ПАП, осуществляющих коллективное радиоподавление НАП, определяется соотношением (2.62) (или (2.63)). Это соотношение справедливо при наличии в составе подавляемой НАП средств ПЗ (в том числе на базе ААР), а также при функционировании подавляемой НАП в любом рабочем режиме.

7. Основным фактором, определяющим требуемую для подавления НАП мощность ПАП (наряду с расстоянием до НАП, количеством ПАП, участвующих в подавлении, и требуемым уровнем показателя качества подавления ( $ПК_{под}$ )) является значение коэффициента улучшения  $K_{ул}^{(ПЗ)}$  отношения (НС/АП), обеспечиваемое средствами ПЗ, имеющимися в распоряжении НАП.

8. По результатам расчетов, выполненных на основе разработанной методики, в случае подавления НАП группой из 4-х ПАП, расположенных на поверхности Земли в вершинах квадрата (НАП расположена в центре квадрата) требуемая мощность каждого ПАП определяется величиной  $K_{ул}^{(ПЗ)}$  и при усилении антенны ПАП 10 дБ составляет (например, для  $q_{вых.треб}^2 = -11.5$  дБ, Р(У)-кода и помехи с равномерной СПМ в полосе НС):

- при  $r_{ПАП}^{НАП} = 1$  км: минус 14 дБВт (при  $K_{ул}^{(ПЗ)} = 10$  дБ), минус 4 дБВт (при  $K_{ул}^{(ПЗ)} = 20$  дБ), 6 дБВт (при  $K_{ул}^{(ПЗ)} = 30$  дБ), 16 дБВт (при  $K_{ул}^{(ПЗ)} = 40$  дБ), 26 дБВт (при  $K_{ул}^{(ПЗ)} = 50$  дБ), 36 дБВт (при  $K_{ул}^{(ПЗ)} = 60$  дБ);

- при  $r_{ПАП}^{НАП} = 10$  км: 6 дБВт (при  $K_{ул}^{(ПЗ)} = 10$  дБ), 16 дБВт (при  $K_{ул}^{(ПЗ)} = 20$  дБ), 26 дБВт (при  $K_{ул}^{(ПЗ)} = 30$  дБ), 36 дБВт (при  $K_{ул}^{(ПЗ)} = 40$  дБ), 46 дБВт (при  $K_{ул}^{(ПЗ)} = 50$  дБ), 56 дБВт (при  $K_{ул}^{(ПЗ)} = 60$  дБ);

- при  $r_{ПАП}^{НАП} = 30$  км: 15.57 дБВт (при  $K_{ул}^{(ПЗ)} = 10$  дБ), 25.57 дБВт (при  $K_{ул}^{(ПЗ)} = 20$  дБ), 35.57 дБВт (при  $K_{ул}^{(ПЗ)} = 30$  дБ), 45.57 дБВт (при  $K_{ул}^{(ПЗ)} = 40$  дБ), 55.57 дБВт (при  $K_{ул}^{(ПЗ)} = 50$  дБ), 65.57 дБВт (при  $K_{ул}^{(ПЗ)} = 60$  дБ).



9. Результаты расчетов по разработанной методике показывают, что радиоподавление образцов НАП, имеющих в своем составе средства помехозащиты с  $K_{ул}^{(ПЗ)}$  на уровне 40 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.

10. Эффективное решение задач радиоподавления современных и перспективных образцов НАП требует разработки специальных способов радиоподавления, позволяющих преодолевать имеющиеся в распоряжении НАП средства ПЗ, включая средства адаптивной пространственной (пространственно-временной) обработки сигналов на базе ААР.

11. Среди применяемых типов помех наиболее универсальны ШП. Они применимы для радиоподавления НАП, работающих с любыми типами НС (при соответствующем выборе ширины спектра ШП). Более эффективны сигналосободные помехи, применение которых позволяет обеспечить увеличение дальности радиоподавления или снижение требований к мощности ПАП. Следует отметить, что сумма сигналосободных помех с рациональным распределением мощности между компонентами может быть эффективнее ШП при одновременном радиоподавлении нескольких навигационных сигналов одной СРНС.

12. Снижение требований к энергетике ПАП при построении ПНПР может быть достигнуто с учетом того обстоятельства, что радиоподавление НАП, работающей в различных режимах (поиск, допоиск НС рабочего НСЗ, слежение за фазой, частотой, задержкой НС) требует различной мощности АП. Например, что в режиме слежения за параметрами НС НАП обладает существенно более высокой помехоустойчивостью (около 7...15 дБ), чем в режиме поиска 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. Это соображение актуально применительно к созданию ПНПР на базе постановщиков активных маскирующих помех в интересах объектово-территориальной защиты.

### 3 ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ АДАПТИВНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ ПОСТАНОВЩИКОВ АКТИВНЫХ ПОМЕХ

В данном разделе изложены результаты компьютерного моделирования работы адаптивных антенных решеток, применяемых в современных помехозащищенных образцах НАП, в условиях воздействия преднамеренных АП. Приведена математическая модель ААР, кратко изложено описание разработанной программы в среде Matlab. Цель разработки компьютерной имитационной модели (КИМ) ААР и проведения модельных экспериментов по оценке помехоустойчивости ААР является:

- получение количественных оценок помехоустойчивости четырехэлементной и семиэлементной АР (ААР4 и ААР7) в условиях действия пространственно-распределенной системы ПАП;
- выявление перспективных подходов к организации радиоподавления НАП, оснащенных ААР4 и ААР7.

#### 3.1 Модель адаптивной антенной решетки

В рамках исследования рассматриваются АР, используемые в навигационных приложениях для пространственной режекции помеховых сигналов и фокусировки на НС (устоявшееся название «beamformer» или адаптивный формирователь лучей). Антенные решетки, применяемые в НАП СРНС, имеют малые габариты (порядка длины волны) и небольшое число АЭ (от 2 до 8), поэтому эффективность их фокусировки невысока, в смысле ширины луча и коэффициента усиления, однако даже при небольшом числе АЭ удастся сформировать глубокие «провалы» в ДН и существенно ослабить помехи.

Модель дискретизованного сигнала с интервалом  $T_{\text{дискр}}$  в канале каждого АЭ АР может быть представлена в следующем виде

$$\mathbf{X}(k) = \mathbf{H}_s \mathbf{S}(k) + \mathbf{H}_i \mathbf{I}(k) + \mathbf{N}(k),$$

где  $k$  – отсчеты НС, АП и СШ (входной процесс), взятые с интервалом дискретизации  $T_{\text{дискр}}$  в соответствии с теоремой Котельникова;

$\mathbf{X}(k) = [\dot{\mathbf{x}}(t_{k-K+1}) \dots \dot{\mathbf{x}}(t_k)] \in V^{N \times K}$  – пространственно-временная матрица входного процесса;  $t_k = kT_{\text{дискр}}$ ;

$\dot{\mathbf{x}}(t_k) \in V^{N \times 1}$  – вектор комплексных амплитуд суммы НС, АП и СШ в момент времени  $t_k$ ;

$N$  – количество АЭ АР;

$K$  – объем выборки входного процесса;

$\mathbf{I}(k) = [\mathbf{i}(t_{k-K+1}) \dots \mathbf{i}(t_k)] \in V^{M_I \times K}$  – временная матрица АП;

$\mathbf{i}(t_k) \in V^{M_I \times 1}$  – вектор комплексных амплитуд АП в момент времени  $t_k$ ;

$M_I$  – количество АП;

$\mathbf{S}(k) = [\dot{\mathbf{s}}(t_{k-K+1}) \dots \dot{\mathbf{s}}(t_k)] \in V^{M_s \times K}$  – временная матрица НС;

$\dot{\mathbf{s}}(t_k) \in V^{M_s \times 1}$  – вектор комплексных амплитуд НС в момент времени  $t_k$ ;

$M_s$  – количество НС;

$\mathbf{N}(k) = [\dot{\mathbf{n}}(t_{k-K+1}) \dots \dot{\mathbf{n}}(t_k)] \in V^{N \times K}$  – временная матрица СШ каналов АР;

$\dot{\mathbf{n}}(t_k) \in V^{N \times 1}$  – вектор комплексных амплитуд СШ в момент времени  $t_k$ ;

$\mathbf{H}_s \in V^{N \times M_s}$  – матрица фокусировки в направлении НС;

$\mathbf{H}_I \in V^{N \times M_I}$  – матрица фокусировки в направлении АП.

Матрица фокусировки в направлении НС  $\mathbf{H}_s$  может быть представлена в следующем виде

$$\mathbf{H}_s = e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(\mathbf{KR})^T},$$

где  $\lambda$  – длина волны несущей НС;

$\mathbf{K}$  – матрица направлений на источники НС в зависимости от азимута ( $\beta_{\text{НСЗ}}(m)$ ) и угла места ( $\varepsilon_{\text{НСЗ}}(m)$ ), которая имеет вид

$$\mathbf{K} = \begin{vmatrix} \cos(\beta_{\text{НСЗ}}(1)) \cos(\varepsilon_{\text{НСЗ}}(1)) & \cos(\beta_{\text{НСЗ}}(1)) \sin(\varepsilon_{\text{НСЗ}}(1)) & \sin(\beta_{\text{НСЗ}}(1)) \\ \dots & \dots & \dots \\ \cos(\beta_{\text{НСЗ}}(m)) \cos(\varepsilon_{\text{НСЗ}}(m)) & \cos(\beta_{\text{НСЗ}}(m)) \sin(\varepsilon_{\text{НСЗ}}(m)) & \sin(\beta_{\text{НСЗ}}(m)) \end{vmatrix},$$

где  $m = 1 \dots M_s$ ;

$\mathbf{R}$  – матрица положения АЭ АР в прямоугольной системе координат

$$\mathbf{R} = \begin{vmatrix} r_x(1) & \dots & r_x(N) \\ r_y(1) & \dots & r_y(N) \\ r_z(1) & \dots & r_z(N) \end{vmatrix}.$$

Аналогично определяется матрица фокусировки в направлениях источников АП  $\mathbf{H}_I$  (угловое положение  $i$  – го ПАП - азимут  $\beta(i)$ , угол места  $\varepsilon(i)$ ,  $i = 1 \dots M_I$ ).

В настоящей работе рассмотрены два типа конфигураций АР, наиболее часто используемых в приложениях СРНС - плоская четырехэлементная АР и плоская семиэлементная АР, для которых матрица  $\mathbf{R}$  имеет вид

$$\mathbf{R}_{\text{ААР4}} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix};$$

$$\mathbf{R}_{\text{AAP7}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 & 0 & -\sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 0 & 1 & 0.5 & -0.5 & -1 & -0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Выходной сигнал ААР определяется как

$$\mathbf{Y} = \mathbf{W}^H \mathbf{X},$$

где  $\mathbf{W} = [w_0 \dots w_{N-1}]^T \in V^{N \times 1}$  - вектор весовых коэффициентов, определяемых в соответствии с выбранными критериями эффективности [4,26];

$(\cdot)^H$  – оператор комплексного транспонирования.

При решении навигационной задачи известно направление на НСЗ – источники НС, а по ним можно рассчитать необходимые для фокусировки векторы  $\mathbf{h}_m$  в направлении  $m$ -го НСЗ. Поэтому в качестве критерия адаптации ААР выбран критерий минимума мощности выходного шума при линейном ограничении ДН в направлении сопровождаемого НСЗ [4,26]:

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

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

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

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

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

Для вычисления вектора оптимальных весовых коэффициентов  $\mathbf{W}_{\text{опт}}$  необходимо получить обратную матрицу  $\hat{\mathbf{R}}_{\text{XX}}$ . В настоящей работе используется метод непосредственного обращения выборочной корреляционной матрицы [4], который обладает высокой скоростью сходимости. Оценка выборочной корреляционной матрицы  $\hat{\mathbf{R}}_{\text{XX}}$  при объеме выборки входного процесса  $K$  определяется соотношением:

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

В качестве меры помехозащитной эффективности ААР приняты:

- коэффициент улучшения ОСП на выходе ААР по отношению к выходу АЭ за счет пространственной обработки  $K_{\text{ул}}^{(\text{простр.обр.})}$ ;

- выигрыш за счет адаптации ААР относительно неадаптивной антенной решетки (НАР), определяемый как отношение

$$K_{\text{ВА}}^{(\text{AAP})} = \frac{K_{\text{ул}}^{(\text{AAP})}}{K_{\text{ул}}^{(\text{НАР})}}.$$

Коэффициент передачи НС ( $K_{\text{пер НС}}^{(AP)}$ ) и коэффициент передачи АП ( $K_{\text{пер АП}}^{(AP)}$ ) при известном векторе оптимальных весовых коэффициентов  $\mathbf{W}_{\text{опт}}$ , а также векторе фокусировки  $\mathbf{h}$  в направлении источника (НС или АП) и усилении АЭ в направлении НСЗ (ПАП)  $G_{\text{АЭ}}^{\text{НСЗ}}$ ,  $G_{\text{АЭ}}^{\text{ПАП}}$ , при условии что АП представляет собой белый гауссовский шум [27], могут быть определены на базе общего применительно к НСЗ и ПАП соотношения:

$$K_{\text{пер}}^{(AP)} = \frac{\mathbf{W}^H \mathbf{h} \mathbf{h}^H \mathbf{W}}{\mathbf{W}^H \mathbf{W}} G_{\text{АЭ}}.$$

Основными декоррелирующими факторами, ограничивающими максимальный коэффициент ослабления ( $K_{\text{осл АП}}^{(AP)}$ ) АП в ААР, является амплитудное и фазовое рассогласование частотных характеристик каналов (с коррекцией) [1]. Чтобы достичь значений ослаблений в реальном устройстве до 45...50 дБ, необходимо обеспечить выравнивание задержек в трактах приема до 0.1 нс, размах разностей АЧХ разных каналов лучше 0.2 дБ, размах разностей ФЧХ лучше 1.2°. В разработанной модели на выходе каждого АЭ добавлены фильтры с соответствующими комплексными частотными характеристиками. Задержка, определяющая размах ФЧХ, и рассогласование АЧХ в каналах АР были выбраны в соответствии с методикой [28].

### 3.2 Краткое описание компьютерной имитационной модели адаптивной антенной решетки

Компьютерная имитационная модель ААР.m позволяет проанализировать воздействие ПАП на четырехэлементную и семиэлементную ААР, работающих по критерию минимизации мощности выходного шума при линейном ограничении ДН в направлении НС НСЗ, сравнить коэффициенты передачи НС и АП одиночного АЭ, ААР, сфокусированной АР и ААР с учетом рассогласований АЧХ и задержки в каналах АР. Программа разработана в Matlab и выполнена в виде вызываемого графического окна с элементами управления.

Возможности КИМ ААР позволяют обеспечить:

- выбор конфигурации ААР: ААР4 и ААР7;
- выбор формы ДН АЭ АР;
- выбор межэлементного расстояния;
- задание объема выборки входного процесса для оценки корреляционной матрицы помех;
- задание координат (азимут, угол места) и мощности для каждого ПАП;
- задание координат источника полезного НС (азимут, угол места);
- задание рассогласования АЧХ и ФЧХ каналов АР;

– оценку коэффициента улучшения ОСП и выигрыша за счет адаптации при воздействии группы ПАП.

В качестве АП в КИМ используется помеха с равномерной СПМ.

На рисунке 3.1 показано основное рабочее окно КИМ ААР.

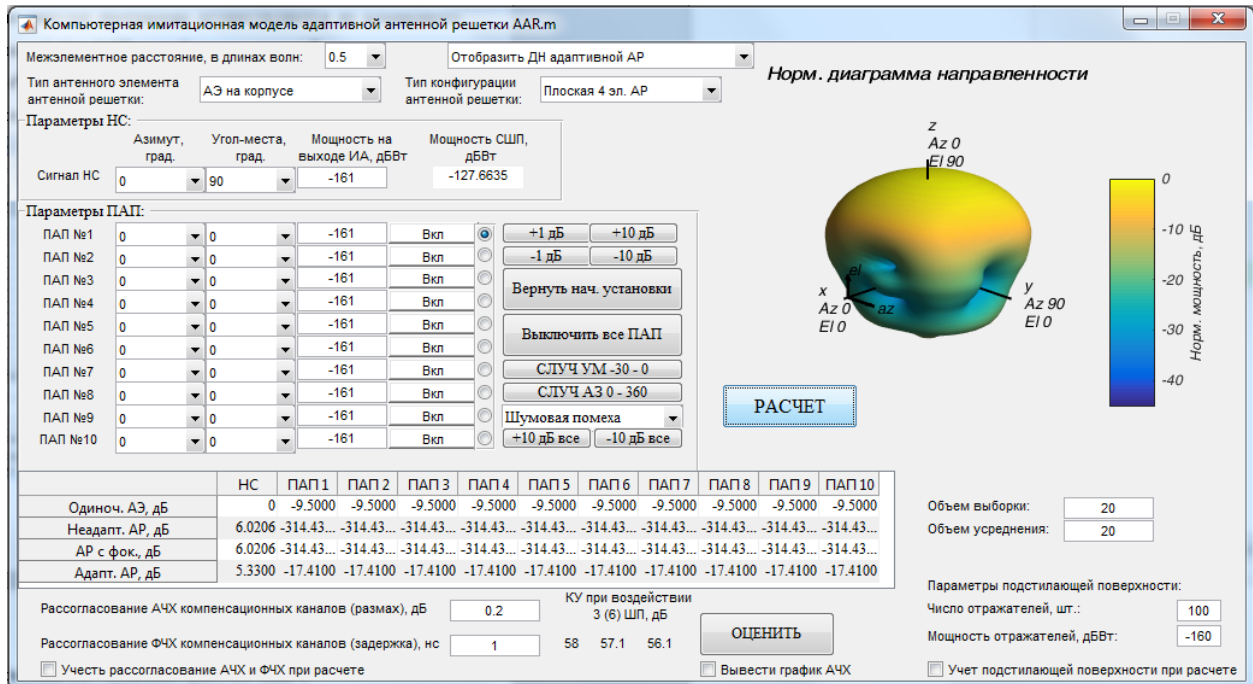


Рисунок 3.1 - Основное рабочее окно КИМ ААР

### 3.3 Модельный эксперимент по оценке эффективности адаптивной антенной решетки как средства помехозащиты навигационной аппаратуры потребителей

Модельный эксперимент проводился с использованием КИМ ААР.m, разработанной в рамках данной работы и описанной в разделе 3.2. Объектами модельного эксперимента являются:

- компьютерная имитационная модель 4-х элементной и 7-и элементной ААР (соответственно ААР4 и ААР7), функционирующей в составе НАП;
- КИМ пространственных конфигураций ПАП согласно рассматриваемым сценариям радиоподавления.

Цель модельного эксперимента:

- получение количественных оценок помехоустойчивости ААР4 и ААР7 в условиях воздействия пространственно-распределенных ПАП;
- выявление перспективных подходов к организации радиоподавления НАП, оснащенных ААР4 и ААР7.

Программа модельного эксперимента предусматривает для случаев использования ААР4

и ААР7 проведение следующих экспериментов:

- эксперимент по расчету ДН ААР, формируемых по результатам адаптации, при различных количестве и расстановке ПАП;
- эксперимент по оценке влияния мощности ПАП на показатели помехоустойчивости ААР;
- эксперимент по оценке влияния количества ПАП на показатели помехоустойчивости ААР;
- эксперимент по оценке влияния азимутального группирования ПАП на характеристики помехоустойчивости ААР;
- эксперимент по оценке влияния взаимного углового положения ПАП и рабочего НСЗ на показатели помехоустойчивости ААР;
- эксперимент по оценке влияния разноса НСЗ и ПАП по азимуту на характеристики помехоустойчивости ААР7;
- эксперимент по оценке влияния положения НСЗ по углу места на характеристики ААР;
- эксперимент по оценке влияния динамики обстановки в процессе радиоподавления на характеристики помехоустойчивости ААР.

Результаты данного раздела опубликованы в работах [56,57].

### 3.3.1 Общие параметры модельного эксперимента

В качестве АЭ для ААР4 и ААР7 принят АЭ типа «антенна на корпусе» [3], нормированная ДН которого приведена на рисунке 3.2. Принято, что ДН одиночного АЭ симметрична в горизонтальной плоскости.

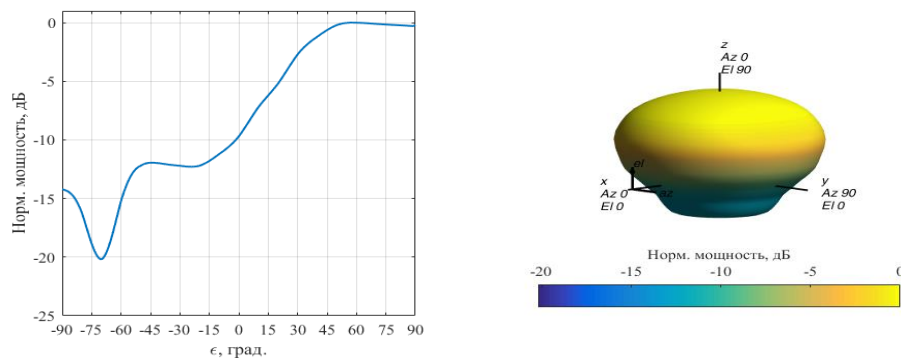


Рисунок 3.2 - Нормированная ДН одиночного АЭ типа «антенна на корпусе»

Для данного АЭ спад коэффициента усиления от направления зенита до плоскости горизонта составляет приблизительно 10 дБ.

На рисунке 3.3 показано размещение АЭ на общем радиопрозрачном основании соответственно для ААР4 и ААР7.

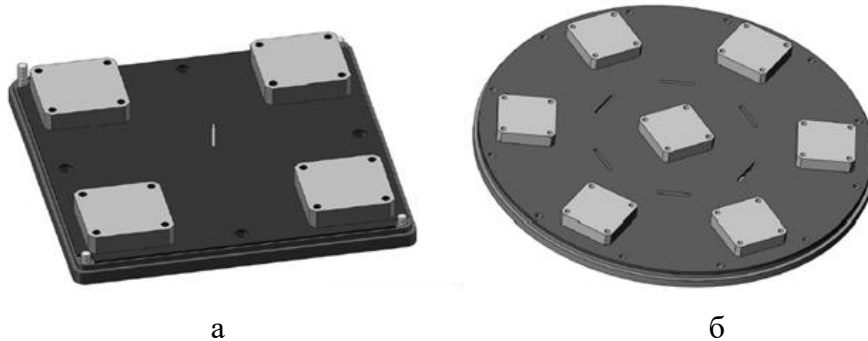


Рисунок 3.3 - Конфигурации АР: а - ААР4, б - ААР7[8]

В случае ААР4 четыре АЭ размещены в вершинах квадрата со стороной, равной половине рабочей длины волны ( $\lambda/2$ ). В случае ААР7 шесть АЭ расставлены в вершинах правильного шестиугольника, а седьмой - в его центре. Межэлементное расстояние принято равным  $\lambda/2$ . Здесь и далее в расчетах несущая частота принята равной 1575,42 МГц ( $\lambda = 0,19$  м). В модели принято допущение о том, что АЭ расположены в свободном пространстве.

На рисунке 3.4 представлены трехмерные изображения нормированных ДН, относящиеся, соответственно, к ААР4 и ААР7 в их неадаптивных вариантах (до начала процесса адаптации). Далее неадаптивные варианты ААР4 и ААР7 будем обозначать, соответственно, НАР4 и НАР7.

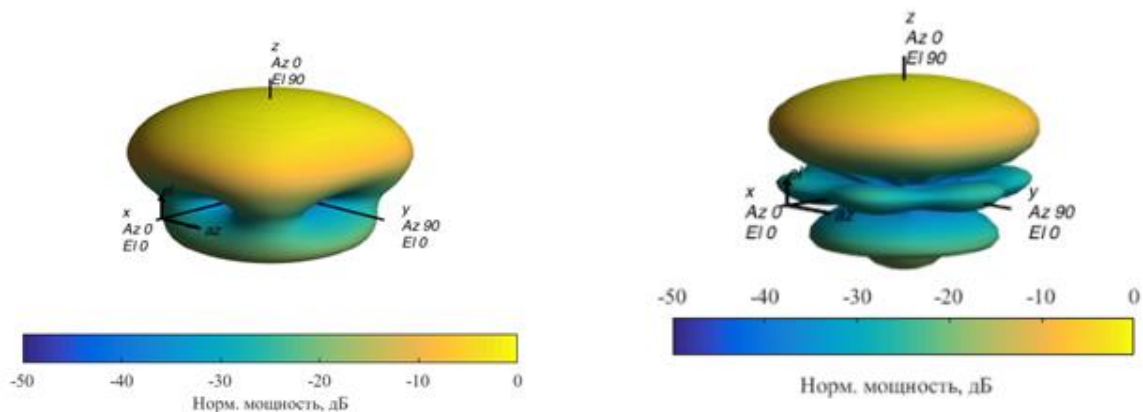


Рисунок 3.4 - Нормированные ДН ААР (до начала адаптации):

а - ААР4, б - ААР7

В качестве основного показателя помехоустойчивости ААР по отношению к АП принят



коэффициент улучшения отношения сигнал/помеха  $K_{ул}^{(AAP)}$  на выходе ААР по отношению к выходу одиночного АЭ (далее КУ ОСП), определяемый согласно (2.38) как произведение:

$$K_{ул}^{(AAP)} = K_{пер\ НС}^{(AP)} \cdot K_{осл\ АП}^{(AP)} \cdot \frac{G_{АЭ}^{НСЗ}}{G_{АЭ}^{ПАП}} = \frac{K_{пер\ НС}^{(AP)} G_{АЭ}^{НС}}{K_{пер\ АП}^{(AP)} G_{АЭ}^{ПАП}},$$

где  $K_{пер\ НС}^{(AP)}$  – коэффициент передачи АР по рабочему НС;

$K_{пер\ АП}^{(AP)}$  – коэффициент передачи АР по АП;

$K_{осл\ АП}^{(AP)}$  – коэффициент ослабления АП;

$G_{АЭ}^{НСЗ}$  – коэффициент усиления одиночного АЭ в направлении НСЗ;

$G_{АЭ}^{ПАП}$  – коэффициент усиления одиночного АЭ в направлении ПАП.

В качестве дополнительного показателя помехоустойчивости ААР в данном эксперименте используется «коэффициент выигрыша за счет адаптации ААР относительно НАР в ОСП»  $K_{ВА}^{(AAP)}$  (далее ВА ОСП), определяемый отношением:

$$K_{ВА}^{(AAP)} = \frac{K_{ул}^{(AAP)}}{K_{ул}^{(НАР)}},$$

где  $K_{ул}^{(НАР)}$  – коэффициент улучшения ОСП, обеспечиваемый рассматриваемой АР в ее неадаптивном варианте (до начала процесса адаптации), когда ее ДН соответствует рисункам 3.4.

Рассогласование АЧХ и ФЧХ каналов ААР в данном модельном эксперименте принято не более 0,2 дБ (размах), а рассогласование каналов по временной задержке не более 0,2 нс. Указанные значения соответствуют данным, приведенным в [1,28].

### 3.3.2 Анализ помехоустойчивости четырехэлементной адаптивной антенной решетки методом модельного эксперимента

#### 3.3.2.1 Эксперимент по расчету ДН ААР4, формируемых по результатам адаптации

*Цель эксперимента:* выявление влияния количества равномерно распределенных по азимуту ПАП на форму ДН ААР4 (после завершения адаптации).

*Условия эксперимента:*

- ААР4 сфокусирована в направлении зенита;
- мощность всех АП, создаваемых ПАП, одинакова и равна минус 80 дБВт (на выходе изотропной антенны (ИА)), при этом отношение АП/СШ по мощности в приемном канале каждого АЭ АР составляет 40 дБ (для каждой АП);
- все ПАП расположены в плоскости  $\varepsilon = 0^\circ$  (плоскость горизонта) с шагом  $(360^\circ/N_{ПАП})$ , начальное значение для  $ПАП_1 \beta_1 = -45^\circ$ . Азимутальный сдвиг на угол минус  $45^\circ$  выбран для того,

чтобы исключить попадание ПАП<sub>1</sub>, от которого отсчитываются азимутальные углы  $\beta_2, \beta_3, \dots, \beta_N$  для ПАП<sub>2</sub>, ... ПАП <sub>$N_{\text{ПАП}}$</sub> , в провал в ДН ААР4.

*Результаты эксперимента.*

На рисунке 3.5 приведены в координатах  $(\beta, \epsilon) = (\text{азимут, угол места})$  сечения ДН ААР4, подвергающейся воздействию  $N_{\text{ПАП}}$  (ПАП<sub>1</sub>, ПАП<sub>2</sub>, ... ПАП <sub>$N_{\text{ПАП}}$</sub> ), горизонтальной плоскостью  $\epsilon = 0^\circ$  и вертикальными плоскостями  $\beta = \text{const}$  (отмечены разными цветами), после завершения адаптации по критерию «минимум мощности выходного шума при линейном ограничении ДН».

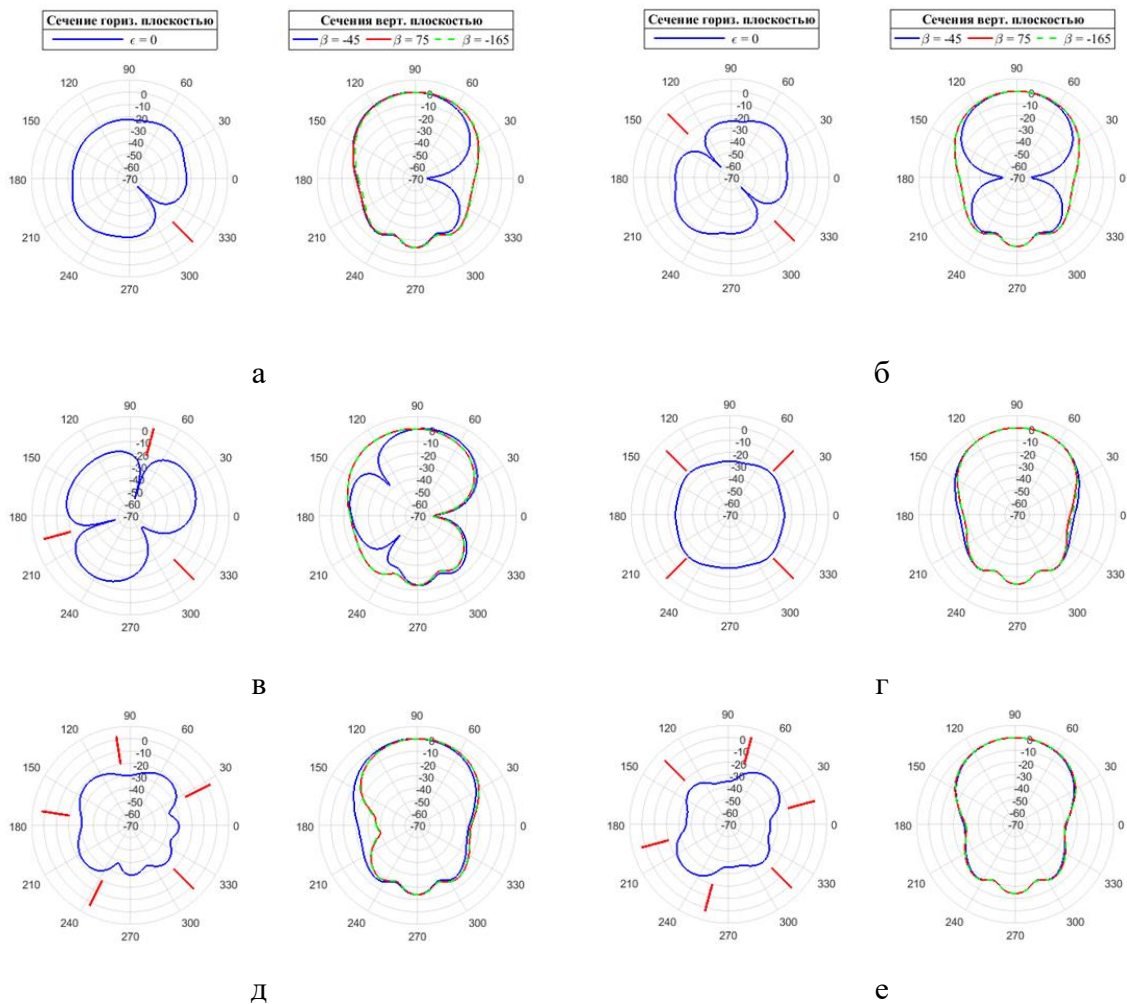


Рисунок 3.5 - Нормированная ДН ААР4 при воздействии  $N_{\text{ПАП}}$ : а -  $N_{\text{ПАП}} = 1$ ,

б -  $N_{\text{ПАП}} = 2$ , в -  $N_{\text{ПАП}} = 3$ , г -  $N_{\text{ПАП}} = 4$ , д -  $N_{\text{ПАП}} = 5$ , е -  $N_{\text{ПАП}} = 6$

Из рисунков видно, что при  $N_{\text{ПАП}} = 1, 2, 3$  (число ПАП меньше числа АЭ АР) ААР4 формирует «точечные» провалы в ДН в направлении всех ПАП. При  $N_{\text{ПАП}} = 3$  дополнительно формируются два паразитных «точечных» провала (рисунок 3.5 (в), правая часть) в ДН, которые не влияют на прием НС, находящегося в зените.

При  $N_{\text{ПАП}} = 4, 5, 6$ , как видно из рисунков 3.5 (г), (д), (е), ААР4 уже не формирует

«точечные» провалы в ДН в направлении ПАП, а при  $N_{\text{ПАП}} = 5$  и 6 минимумы ДН не совпадают с направлениями на ПАП. Ситуация, когда ААР не формирует провалов в ДН в направлениях ПАП, может трактоваться как «перегрузка» ААР. Именно таким ситуациям соответствуют рисунки 3.5 (г), (д), (е).

Таким образом, если ПАП равномерно распределены по азимуту и число ПАП больше трех, то ААР4 находится в состоянии «перегрузки», при этом она теряет способность формировать «точечные» провалы в ДН в направлениях ПАП. В состоянии «перегрузки» КУ ОСП ААР4 может превышать КУ ОСП, обеспечиваемый НАР4, всего на несколько дБ. Иначе говоря, при таких условиях ВА ОСП ААР4 по отношению к НАР4 несущественен или отсутствует по сравнению с нормальным режимом функционирования ААР4 (до трех АП).

*Вывод по результатам эксперимента.*

Нейтрализация ААР4 как средства помехозащиты НАП возможна при участии в радиоподавлении НАП не менее четырех ПАП, равномерно расставленных по азимуту. При этом ВА ОСП ААР4 относительно НАР4 может достигать всего нескольких дБ.

### **3.3.2.2 Эксперимент по оценке влияния мощности ПАП на показатели помехоустойчивости ААР4**

*Цель эксперимента:* выявление влияния мощности ПАП на эффективность радиоподавления ААР4.

*Условия эксперимента:*

- ААР4 сфокусирована в направлении зенита;
- мощность всех АП, создаваемых ПАП, одинакова и соответствует мощности, измеренной на выходе ИА;
- все ПАП расположены в плоскости  $\varepsilon = 0^\circ$  (плоскость горизонта);
- ПАП распределены равномерно по окружности с шагом  $(360^\circ/N_{\text{ПАП}})$ , начиная с  $\beta_1 = -45^\circ$ .

*Результаты эксперимента.*

Результаты расчетов зависимостей КУ ОСП ААР4 и ВА ОСП ААР4 от мощности АП на выходе ИА и числа  $N_{\text{ПАП}}$  представлены на рисунках 3.6 и 3.7 соответственно.

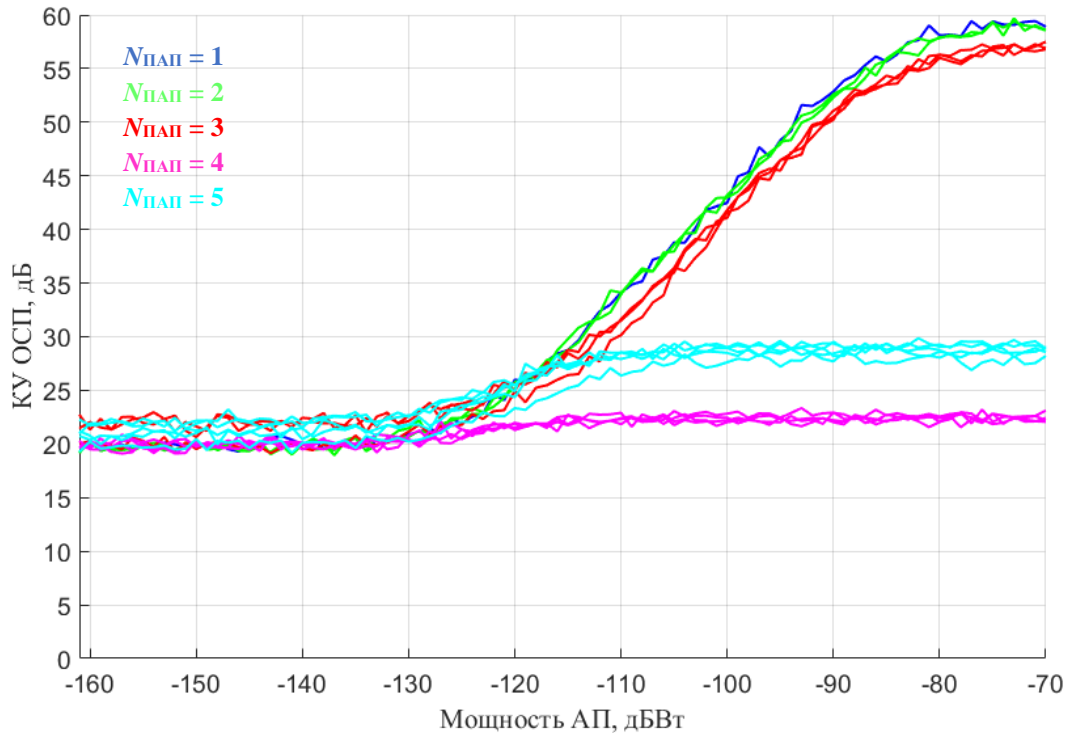


Рисунок 3.6 - Зависимости КУ ОСП ААР4 от мощности АП для разных  $N_{ПАП}$

Анализ зависимостей показывает, что при уровнях мощности АП (не более минус 120 дБВт на выходе ИА или не более минус 128 дБВт на выходе используемого АЭ (с учетом коэффициента усиления в направлении ПАП)), не превышающих мощность СШ приемного канала АЭ (примерно минус 128 дБВт), КУ ОСП ААР4 практически одинаков с КУ ОСП НАР4 и не превышает 23...25 дБ. То есть, при указанных условиях ВА ОСП отсутствует или несуществен. Рост КУ ОСП наступает при мощности АП на уровне минус 130 дБВт (когда мощность АП приближается к мощности СШ приемного канала АЭ). При этом видно, что при  $N_{ПАП} = 1, 2, 3$  увеличение мощности АП до уровня минус 80 дБВт приводит к пропорциональному увеличению КУ ОСП.

Иная ситуация наблюдается при воздействии на ААР4 четырех и более ПАЭ. Из графиков видно, что при  $N_{ПАП} = 4$  и 5 величина КУ ОСП мало зависит от мощности АП на выходе АЭ. При этом уровни КУ ОСП ААР4 практически одинаковы с уровнями КУ ОСП НАР4 (ВА ОСП не более 5 дБ).

ВА ОСП несуществен или отсутствует, если мощность АП не превышает минус 120 дБВт при любом числе ПАЭ. Если  $N_{ПАП} = 1, 2, 3$ , то при мощности АП больше минус 120 дБВт ВА ОСП увеличивается пропорционально мощности АП до уровня 35 дБ. При воздействии на ААР4 четырех и более ПАЭ с увеличением мощности АП ВА ОСП уже не имеет выраженной зависимости от мощности АП. При этом видно, что для некоторых азимутальных направлений на ПАЭ

ВА ОСП отрицательный (ААР4 хуже НАР4), а для других ПАП не превышает 5 дБ.

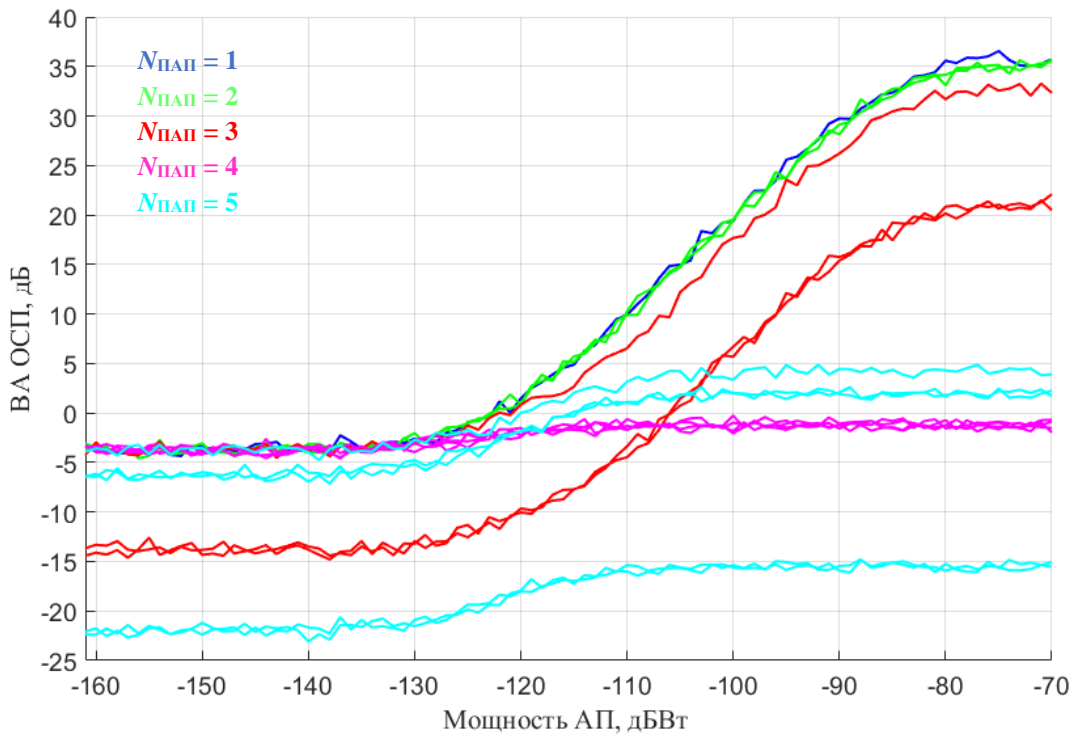


Рисунок 3.7 - Зависимости ВА ОСП ААР4 от мощности АП для разных  $N_{\text{ПАП}}$

Таким образом, наращивание мощности ПАП при  $N_{\text{ПАП}} = 1, 2, 3$  приводит к пропорциональному увеличению КУ ОСП, и, следовательно, является неэффективной мерой при организации радиоподавления НАП, оснащенной ААР4. Эффективной мерой является выбор числа ПАП  $N_{\text{ПАП}} \geq 4$ , при этом возможна «перегрузка» ААР4, что означает отсутствие ВА ОСП ААР4 относительно НАР4. Мощность каждого ПАП при  $N_{\text{ПАП}} \geq 4$  должна быть выбрана достаточной для достижения требуемого качества коллективного радиоподавления НАП.

*Вывод по результатам эксперимента.*

Радиоподавление НАП, оснащенной ААР4, должно быть коллективным с участием не менее четырех ПАП, при этом мощность каждого ПАП следует выбирать из условия обеспечения требуемого уровня качества подавления НАП.

### 3.3.2.3 Эксперимент по оценке влияния количества ПАП на показатели помехоустойчивости ААР4

*Цель эксперимента:* выявление влияния количества ПАП на эффективность радиоподавления ААР4.

*Условия эксперимента:*

- все ПАП расположены в плоскости горизонта;

- все ПАП расставлены по азимуту равномерно в пределах  $360^\circ$ ;
- ААР4 сфокусирована в направлении зенита.

*Результаты эксперимента.*

На рисунке 3.8 представлены в виде семейств графиков результаты расчетов зависимостей КУ ОСП и ВА ОСП (усредненных по всем действующим ПАП) от количества ПАП при фиксированной мощности ПАП.

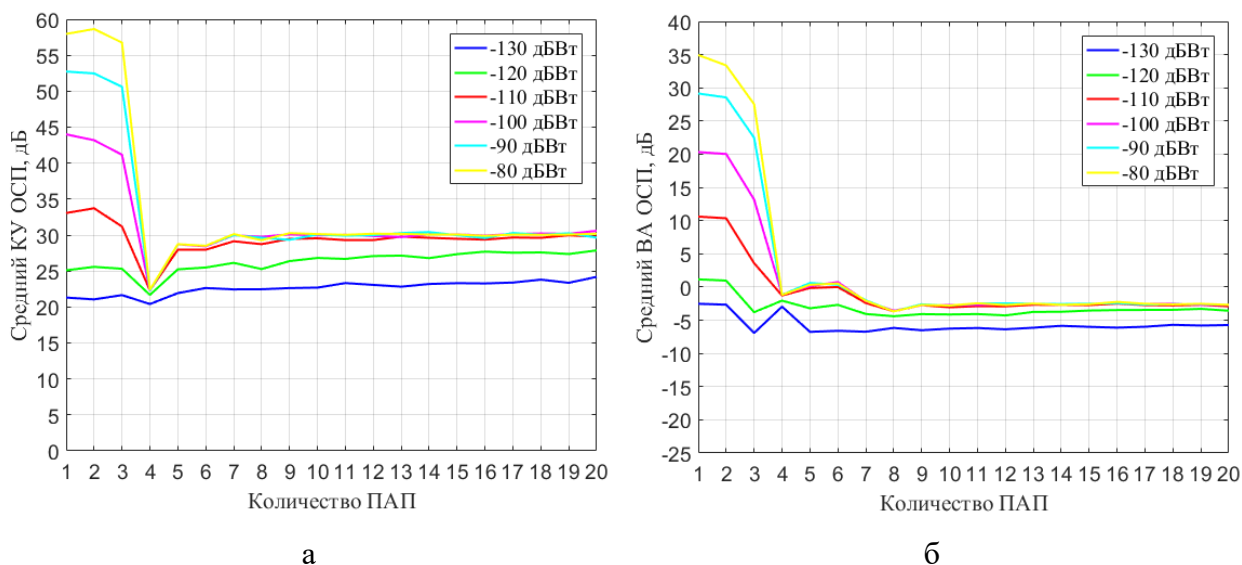


Рисунок 3.8 - Зависимости КУ ОСП (а) и ВА ОСП (б) ААР4 от количества ПАП при фиксированной мощности ПАП

Результаты расчетов, как и ожидалось с учетом результатов предыдущих экспериментов, демонстрируют сильное снижение эффективности ААР4 при воздействии четырех и более ПАП. При  $N_{\text{ПАП}} \geq 4$  ААР4 находится в состоянии «перегрузки», а ВА ОСП, усредненный по всем ПАП, меньше 0 дБ. Это означает, что при  $N_{\text{ПАП}} \geq 4$  ААР4 обладает меньшей помехоустойчивостью, чем НАР4. КУ ОСП при любом  $N_{\text{ПАП}} \geq 4$  не превышает 30 дБ. Отсюда следует, что, хотя при  $N_{\text{ПАП}} \geq 4$  ААР4 считается подавленной (ВА ОСП отсутствует), при расчете требуемой мощности ПАП необходимо учитывать ослабление помех за счет формы ДН НАР4 (помехи действуют по боковым лепесткам ДН НАР4).

*Вывод по результатам эксперимента.*

Радиоподавление НАП, оснащенной ААР4, должно быть коллективным с участием не менее четыре ПАП. При  $N_{\text{ПАП}} \geq 4$  определение требуемой мощности каждого ПАП следует проводить с учетом того, что в состоянии «перегрузки» ААР4 помехи действуют на подавляемую НАП по боковым лепесткам ДН НАР4, уровень которых обеспечивает величину КУ ОСП до 30 дБ.

### 3.3.2.4 Эксперимент по оценке влияния группирования ПАП по азимуту на характеристики помехоустойчивости ААР4

*Цель эксперимента:* выявление влияния различных вариантов азимутальной расстановки ПАП на эффективность радиоподавления ААР4.

*Условия эксперимента:*

- все ПАП расположены в плоскости горизонта;
- азимутальный разнос  $\Delta\beta_{\text{ПАП-ПАП}}$  между соседними ПАП одинаков
- ААР4 сфокусирована в направлении зенита;
- мощность всех АП, создаваемых ПАП, на выходе ИА составляет минус 80 дБВт.

В данном эксперименте рассмотрена зависимость КУ ОСП ААР4 от величины углового разноса  $\Delta\beta_{\text{ПАП-ПАП}}$  соседних ПАП по азимуту, а также от азимутального положения ПАП  $\beta_{\text{ПАП1}}$ .

*Результаты эксперимента.*

На рисунке 3.9 представлены диаграммы КУ ОСП ААР4 для одного из ПАП (конкретно, для ПАП<sub>3</sub>) при воздействии на ААР4 четырех и пяти ПАП.

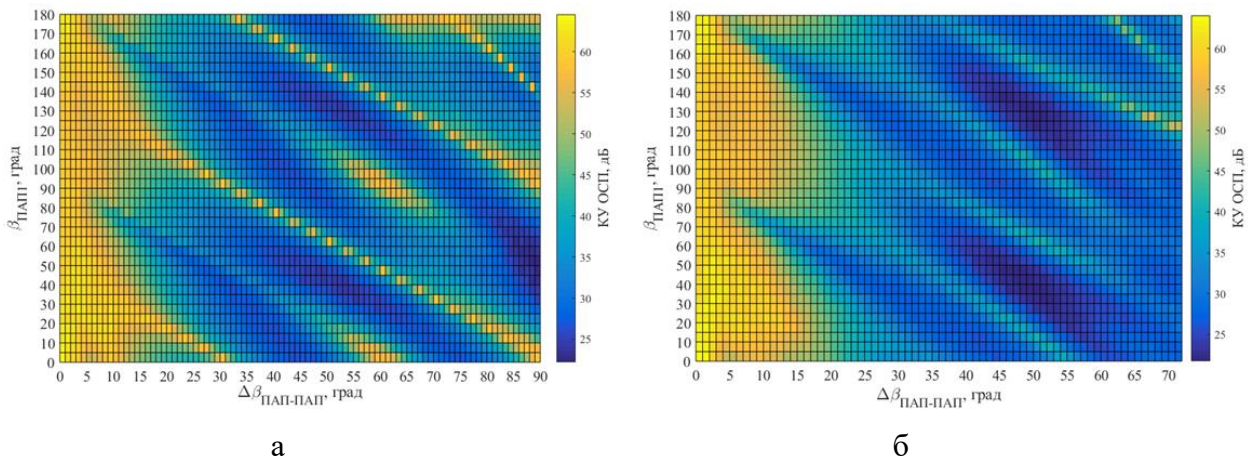


Рисунок 3.9 - Диаграммы КУ ОСП ААР4 в зависимости от  $\Delta\beta_{\text{ПАП-ПАП}}$  и  $\beta_{\text{ПАП1}}$  применительно к ПАП<sub>3</sub>: а -  $N_{\text{ПАП}} = 4$ , б -  $N_{\text{ПАП}} = 5$

Анализ полученных диаграмм показывает, что если  $N_{\text{ПАП}} = 4$  и угловой разнос  $\Delta\beta_{\text{ПАП-ПАП}}$  соседних ПАП невелик (менее  $20^\circ$ ), то ААР4 достаточно эффективно ослабляет все четыре ПАП (смотри желтую и желто-зеленую тональность на диаграмме), при этом наименьшее значение КУ ОСП составляет 30 дБ, 36 дБ и 43 дБ для  $\Delta\beta_{\text{ПАП-ПАП}}$   $20^\circ$ ,  $15^\circ$  и  $10^\circ$  соответственно. При  $\Delta\beta_{\text{ПАП-ПАП}}$  более  $20^\circ$  наименьшее значение КУ ОСП падает до 21 дБ с ростом  $\Delta\beta_{\text{ПАП-ПАП}}$ . Следует отметить, что даже при большом азимутальном разноре  $\Delta\beta_{\text{ПАП-ПАП}}$  соседних ПАП (более  $20^\circ$ ) существуют «неудачные» варианты расстановки ПАП на линии горизонта (смотри желтые наклонные полосы). Отмеченный эффект объясняется тем, что при таких расстановках один или несколько

ПАП попадают в области нулей ДН ААР4.

На рисунке 3.9 (б) представлена диаграмма КУ ОСП, относящаяся к случаю  $N_{\text{ПАП}} = 5$ . Сравнение с рисунком 3.9 (а) показывает, что при  $N_{\text{ПАП}} = 5$  зона целесообразного расположения ПАП увеличилась, а при азимутальном разnose соседних ПАП  $\Delta\beta_{\text{ПАП-ПАП}}$  более  $20^\circ$  значение КУ ОСП в направлении некоторых ПАП падает до 30 дБ и менее, что соответствует «перегрузке» ААР4, при которой ВА ОСП несущественен или отсутствует.

При воздействии пяти ПАП с  $\Delta\beta_{\text{ПАП-ПАП}}$  не менее  $26^\circ$ , шести ПАП с  $\Delta\beta_{\text{ПАП-ПАП}}$  не менее  $21^\circ$ , семи ПАП с  $\Delta\beta_{\text{ПАП-ПАП}}$  не менее  $17^\circ$  - средний ВА ОСП по всем ПАП находится в интервале от минус 4 до 10 дБ, а среднее значение КУ ОСП по всем ПАП НБ лежит в интервале от 26 до 38 дБ.

На рисунке 3.10 представлена нормированная ДН ААР4 для случая азимутальной расстановки ПАП ( $N_{\text{ПАП}} = 4$ ,  $\beta_{\text{ПАП1}} = 20^\circ$ ,  $\Delta\beta_{\text{ПАП-ПАП}} = 10^\circ$ ).

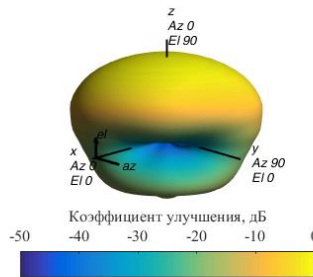


Рисунок 3.10 - Нормированная ДН ААР4 при азимутальной расстановке ПАП

$$(N_{\text{ПАП}} = 4, \beta_{\text{ПАП1}} = 20^\circ, \Delta\beta_{\text{ПАП-ПАП}} = 10^\circ)$$

Видно, что при воздействии четырех ПАП с малым азимутальным разномом ААР4 формирует в области расположения всех ПАП вытянутый провал типа «овраг», при этом все ПАП эффективно режектируются. С увеличением азимутального разноса  $\Delta\beta_{\text{ПАП-ПАП}}$  КУ ОСП уменьшается.

Таким образом, расстановка четырех и пяти ПАП в виде компактной группы с малыми азимутальными разносами между соседними ПАП, с точки зрения организации радиоподавления НАП с ААР4, невыгодна. Причина заключается в том, что ААР4 может формировать ДН с провалом вида «овраг», перекрывающим всю азимутальную зону расположения группы ПАП. Формирование такого провала позволяет ААР4 эффективно режектировать все ПАП «компактной» группы. Более выгодной является равномерная расстановка по азимуту четырех и более ПАП, при которой уже при  $N_{\text{ПАП}} = 4$  возможно «перегрузить» ААР4.

*Вывод по результатам эксперимента.*



При организации коллективного радиоподавления НАП, оснащенной ААР4, наземными ПАП с взаимными азимутальными разносами менее  $20^\circ$  нецелесообразна. При  $N_{\text{ПАП}} = 4, 5$  следует расставлять ПАП равномерно по азимуту, при этом уже при  $N_{\text{ПАП}} = 4$  наблюдается «перегрузка» ААР4 и ВА ОСП отсутствует. Допустимый азимутальный разнос между соседними ПАП НБ, при котором средний ВА ОСП снижается до 10 дБ и менее, уменьшается с ростом числа ПАП и составляет для пяти, шести и семи ПАП не менее  $26^\circ$ ,  $21^\circ$  и  $17^\circ$  градусов соответственно.

### 3.3.2.5 Эксперимент по оценке влияния взаимного углового положения ПАП и рабочего НСЗ на характеристики помехоустойчивости ААР4

*Цель эксперимента:* выявление влияния взаимного разноса ПАП и рабочего НСЗ по азимуту и углу места на эффективность радиоподавления ААР4.

*Условия эксперимента:*

- $N_{\text{ПАП}} = 3, 4$ ;
- ПАП<sub>1</sub>, ПАП<sub>2</sub>, ПАП<sub>3</sub>, ПАП<sub>4</sub> расположены выше горизонта под углами  $\varepsilon_{\text{ПАП}} = 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$  соответственно;
- расстановка ПАП по азимуту равномерная в пределах  $360^\circ$ , причем ПАП<sub>1</sub> расположен на азимуте минус  $45^\circ$ ;
- ААР4 сфокусирована на НСЗ ( $\beta = 0^\circ; \varepsilon = 70^\circ$ );
- мощность всех АП одинакова и равна минус 80 дБВт (на выходе ИА).

*Результаты эксперимента.*

Из проведенных выше исследований следует, что при достижении «перегрузки» ААР4 КУ ОСП определяется, в основном, формой ДН ААР4. Это дает основание предположить, что те ПАП, которые воздействуют на ААР4 со стороны верхней полусферы (выше плоскости горизонта) будут существенно эффективнее, чем ПАП, расположенные на линии горизонта и ниже.

На рисунке 3.11 показаны трехмерные ДН ААР4 после завершения адаптации в направлении трех и четырех ПАП ВБ соответственно.

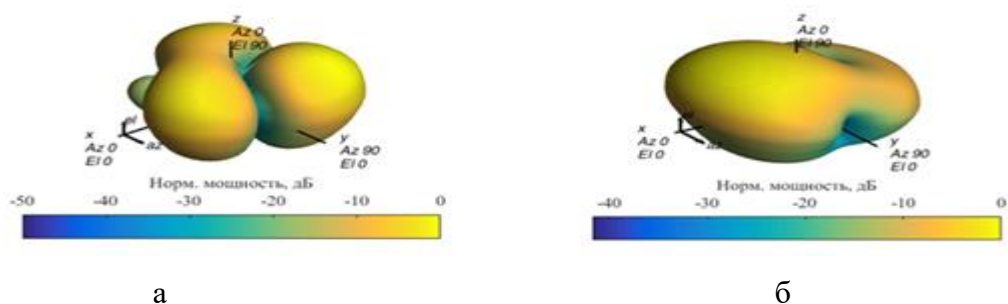


Рисунок 3.11 - Нормированная ДН ААР4 (после завершения адаптации) при воздействии ПАП ВБ: а -  $N_{\text{ПАП}} = 3$ , б -  $N_{\text{ПАП}} = 4$

В таблице 3.1 приведены значения КУ ОСП и ВА ОСП при воздействии трех ПАП. Из таблицы видно, что все три ПАП эффективно режектируются.

Таблица 3.1 - Значения КУ ОСП и ВА ОСП ААР4 при  $N_{\text{ПАП}} = 3$

Азимут ПАП $\beta$ , град.	-45	75	-135
Угол места $\varepsilon$ , град.	40	50	60
$K_{\text{ул}}^{(\text{ААР4})}$ , дБ	40	41	39
$K_{\text{ВА}}^{(\text{ААР4})}$ , дБ	33	37	38

В таблице 3.2 приведены значения КУ ОСП и ВА ОСП ААР4 при воздействии четырех ПАП.

Таблица 3.2 - Значения КУ ОСП и ВА ОСП ААР4 при  $N_{\text{ПАП}} = 4$

Азимут ПАП $\beta$ , град.	-45	45	135	-135
Угол места ПАП $\varepsilon$ , град.	40	50	60	70
$K_{\text{ул}}^{(\text{ААР4})}$ , дБ	2	2	9	7
$K_{\text{ВА}}^{(\text{ААР4})}$ , дБ	-4	-1.5	7.6	7.2

Приведенные данные свидетельствуют о том, что создание АП со стороны верхней полу-сферы гораздо эффективнее (в данном эксперименте на (21...28) дБ по величине КУ ОСП), чем с линии горизонта (с поверхности Земли).

В данном эксперименте была рассчитана также представляющая интерес зависимость коэффициента передачи ААР4 по НС ( $K_{\text{пер НС}}^{(\text{АР})}$ ) от азимутального разноса ПАП и сопровождаемого НСЗ.

На рисунке 3.12 приведены семейства графиков зависимостей  $K_{\text{пер НС}}^{(\text{АР})}$  от углового разноса одиночного ПАП и НСЗ  $\Delta\beta_{\text{ПАП-НСЗ}}$  по азимуту при различных значениях угла места НСЗ  $\varepsilon_{\text{НСЗ}}$  и мощности АП. Принято, что угол места ПАП  $\varepsilon_{\text{ПАП}} = 0^\circ$ , азимут  $\beta_{\text{НСЗ}} = 0^\circ$ .

Анализ полученных зависимостей показывает, что при увеличении мощности АП ААР4 формирует более глубокий «точечный» провал в ДН, при этом азимутальный сектор ( $\Delta\beta_{\text{ПАП-НСЗ}} = \pm 60^\circ$ ), в котором происходит ухудшение условий приема НС, практически не изменяется. Наблюдается симметрия в ухудшении коэффициента передачи НС при воздействии АП с азимутальным рассогласованием между ПАП и НСЗ  $0^\circ$  и  $\pm 180^\circ$ .

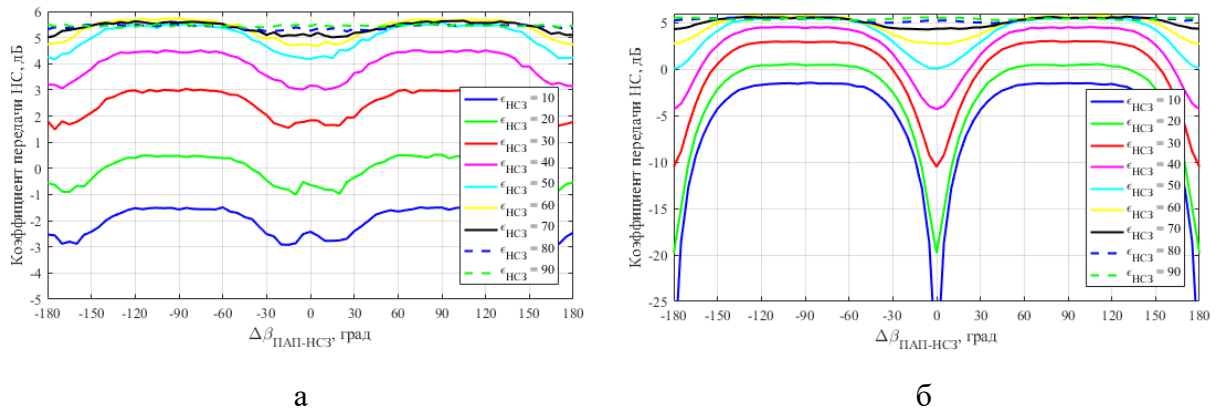


Рисунок 3.12 – Зависимость  $K_{\text{пер НС}}^{(\text{ААР4})}$  от  $\Delta\beta_{\text{ПАП-НСЗ}}$ :

а - мощность АП минус 120 дБВт, б - мощность АП минус 80 дБВт

*Вывод по результатам эксперимента.*

При организации коллективного радиоподавления НАП, оснащенной ААР4, с участием 4-х ПАП, эффективность радиоподавления НАП резко повышается при размещении всех или части ПАП выше линии горизонта. Выигрыш в величине КУ ОСП ААР4 для ПАП, расположенных выше плоскости горизонта, может достигать (21...28) дБ по сравнению со случаем использования ПАП наземного базирования (НБ), воздействующих с линии горизонта.

### 3.3.2.6 Эксперимент по оценке влияния динамики обстановки в процессе радиоподавления на характеристики помехоустойчивости ААР4

*Цель эксперимента:* выявление влияния длительности процесса адаптации ААР4 на эффективность радиоподавления ААР4.

*Условия эксперимента:*

- ПАП расположен в плоскости горизонта, азимут  $\beta_{\text{ПАП}} = -45^\circ$ , угол места  $\theta_{\text{ПАП}} = 0^\circ$ ;
- ААР4 сфокусирована в направлении зенита.

*Результаты эксперимента.*

С точки зрения оценки влияния динамики обстановки на характеристики помехоустойчивости ААР4 целесообразно выяснить длительность процесса адаптации, то есть, время, требуемое для формирования ДН требуемой формы (с провалами в направлениях ПАП).

Это время определяет динамические характеристики ААР, то есть способность адаптироваться к изменяющейся помеховой обстановке.

В данном эксперименте время адаптации оценивается на основе расчетов зависимости КУ ОСП ААР4 от объема выборки входного процесса  $K$  при воздействии на ААР4 одиночного ПАП.

Результаты эксперимента представлены в виде семейства графиков на рисунке 3.13.

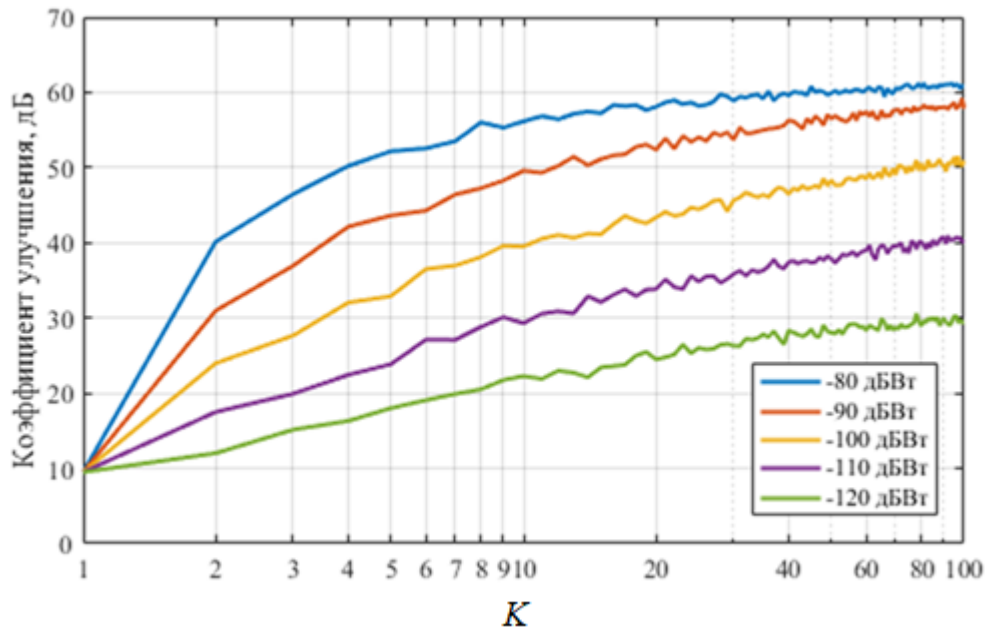


Рисунок 3.13 - Зависимость КУ ОСП ААР4 от объема выборки входного процесса  $K$

Анализ графиков показывает, что при воздействии мощной АП (минус 80 дБВт на выходе ИА) приемлемый уровень КУ ОСП достигается уже при  $K = 4$ . При уменьшении мощности АП процесс адаптации существенно затягивается. Это приводит к значительному снижению величины КУ ОСП, достигаемой при одинаковых значениях объема выборки  $K$ . Существенно, что увеличение  $K$  приводит к росту затрат времени на выполнение операций накопления и обращения корреляционной матрицы помех. Поэтому с точки зрения организации радиоподавления НАП следует уменьшать мощность АП до некоторого приемлемого уровня достаточного для подавления НАП, при этом время, затрачиваемое на обновление вектора весовых коэффициентов ААР4, увеличивается.

Как указано в [4], объем выборки  $K$ , необходимый для достижения уровня на 3 дБ ниже оптимального в условиях, когда ОСП значительно меньше единицы и при известном направлении на полезный сигнал, приблизительно равно удвоенному числу АЭ ААР. В нашем случае такой уровень при мощной АП достигается при  $K \geq 15$ . Исходя из этого при выполнении всех рассмотренных выше расчетов было принято значение  $K = 20$ .

В работе [29] было оценено суммарное время, требуемое для выполнения необходимых операций по накоплению и обращению корреляционной матрицы помех для ААР4 при  $K = 4, 20, 60$ . Это время составило соответственно 0,6 мкс, 35 мкс и 800 мкс. Именно это время определяет динамические характеристики ААР4.

Таким образом, по результатам эксперимента объем выборки, достаточный для завершения адаптации, составил 20 отсчетов при любых уровнях мощности действующей АП. Согласно

[29] это приводит к потребным временным затратам на адаптацию несколько десятков мкс (35 мкс). За такое время носитель НАП, двигающийся со скоростью (сотни...тысячи) м/сек, успевает переместиться по своей траектории лишь на (доли...единицы) сантиметров.

*Выводы по результатам эксперимента.*

1. Динамические характеристики ААР4 определяются величиной времени адаптации, которое для перспективных образцов НАП составляет (единицы ... десятки) мкс (порядка 35 мкс и менее).

2. При значениях времени адаптации, составляющих (единицы...десятки) мкс, практически отсутствует влияние динамики перемещения носителей НАП на эффективность адаптации ААР4.

4. При организации радиоподавления НАП, оснащенной ААР4, путем создания «мерцающих» радиопомех, период мерцаний ПАП должен быть меньше указанной величины времени адаптации подавляемой ААР4. То есть, потребуется излучение мерцающей АП с периодом мерцаний порядка единиц микросекунд.

### **3.3.3 Анализ помехоустойчивости семиэлементной адаптивной антенной решетки методом модельного эксперимента**

#### **3.3.3.1 Эксперимент по расчету ДН ААР7, формируемых в результате адаптации**

*Цель эксперимента:* выявление влияния количества равномерно распределенных по азимуту ПАП на форму ДН ААР7 (после завершения адаптации).

*Условия эксперимента:*

- ААР7 сфокусирована в направлении зенита;
- мощность всех АП, создаваемых ПАП, одинакова и равна минус 80 дБВт;

- все ПАП расположены в плоскости  $\varepsilon = 0^\circ$  с шагом  $(360^\circ/N_{\text{ПАП}})$ , начальное значение для ПАП<sub>1</sub>  $\beta_1 = -45^\circ$ .

*Результаты эксперимента.*

На рисунке 3.14 приведены сечения ДН ААР7, подвергающейся воздействию  $N_{\text{ПАП}}$  (ПАП<sub>1</sub>, ПАП<sub>2</sub>,...ПАП <sub>$N_{\text{ПАП}}$</sub> ), горизонтальной плоскостью  $\varepsilon = 0^\circ$  и вертикальными плоскостями  $\beta = \text{const}$  (отмечены разными цветами), после завершения адаптации по критерию «минимум мощности выходного шума при линейном ограничении ДН».

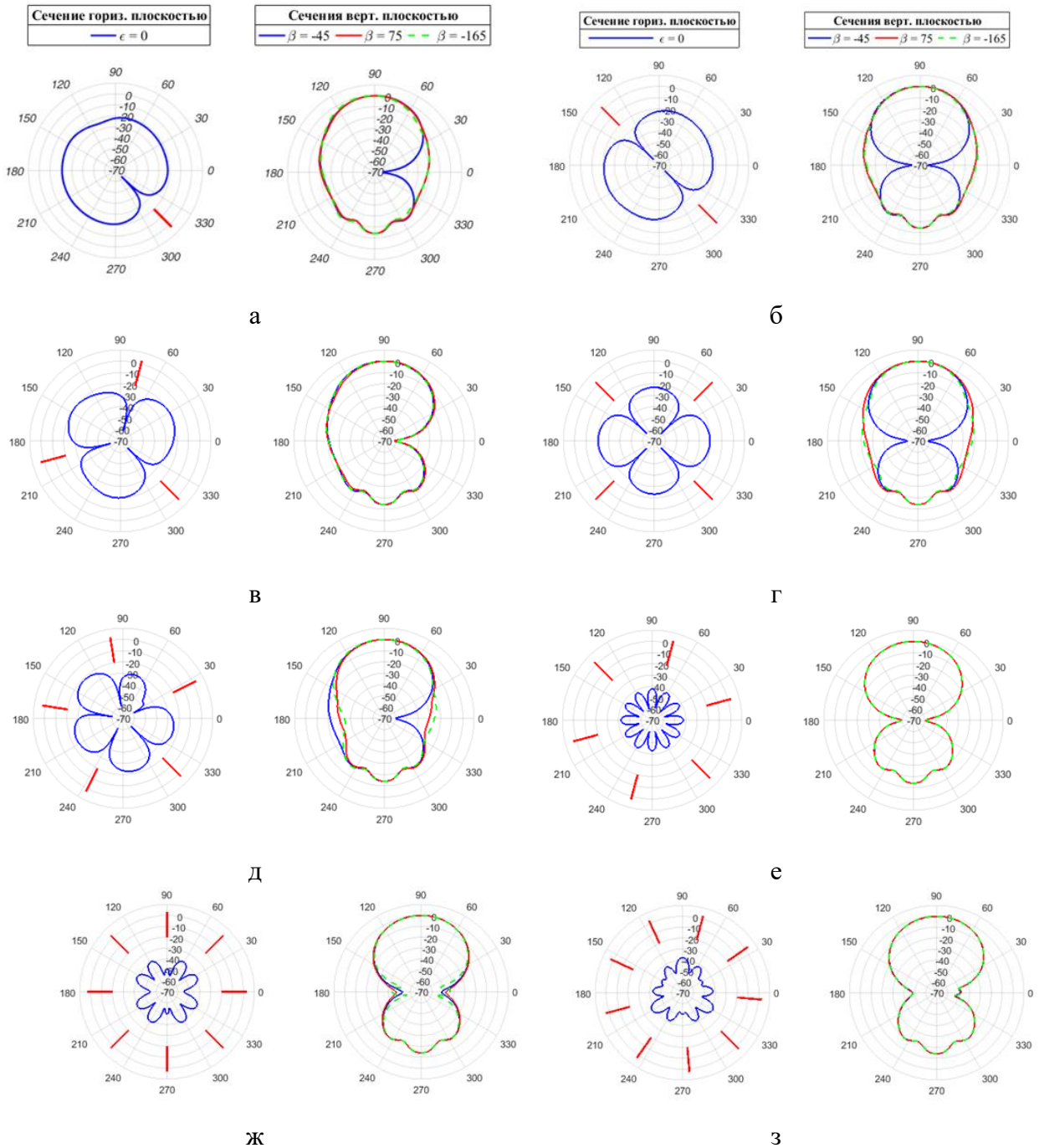


Рисунок 3.14 - Нормированная ДН ААР7 при воздействии  $N_{\text{ПАП}}$  (после адаптации): а -  $N_{\text{ПАП}} = 1$ , б -  $N_{\text{ПАП}} = 2$ , в -  $N_{\text{ПАП}} = 3$ , г -  $N_{\text{ПАП}} = 4$ , д -  $N_{\text{ПАП}} = 5$ , е -  $N_{\text{ПАП}} = 6$ , ж -  $N_{\text{ПАП}} = 8$ , з -  $N_{\text{ПАП}} = 9$

Анализ результатов расчетов ДН ААР7 позволяет выявить следующее.

Из рисунков 3.14 (а), (б), (в), (г) видно, что ААР7 формирует «точечные» провалы в ДН в направлениях до пяти ПАП. При увеличении количества ПАП до шести и более ААР7 уже не формирует ярко выраженных «точечных» провалов в ДН в направлениях ПАП, при этом значение нормированной ДН ААР7 не превышает минус 35 дБ в максимумах, несовпадающих с

направлениями на ПАП. Таким образом, можно заключить, что при воздействии на ААР7 шести и более ПАП НБ адаптивный алгоритм ААР7 формирует «кольцевой» провал в ДН, обеспечивающий режекцию всех ПАП, находящихся в плоскости горизонта.

На рисунке 3.15 показана нормированная ДН ААР7, сфокусированной в направлении зенита, при воздействии девяти ПАП, расставленных в плоскости горизонта равномерно по азимуту.

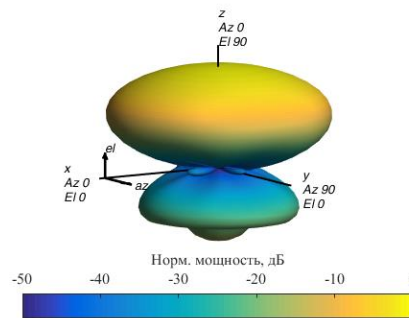


Рисунок 3.15 - Нормированная ДН ААР7 с «кольцевым» провалом при  $N_{\text{ПАП}} = 9$

Формирование «кольцевого» провала в ДН в направлении горизонта является особенностью ААР7, используемых в составе НАП воздушных ЛА.

*Вывод по результатам эксперимента.*

Если все ПАП, участвующие в радиоподавлении НАП, оснащенной ААР7, расположены в плоскости горизонта (в окрестности плоскости горизонта) и  $N_{\text{ПАП}} \geq 6$ , то ААР7 формирует «кольцевой» провал в ДН, обеспечивающий режекцию всех ПАП НБ. Это обстоятельство делает неэффективным наращивание количества ПАП НБ как средства обеспечения эффективного радиоподавления НАП, оснащенной ААР7.

### 3.3.3.2 Эксперимент по оценке влияния мощности ПАП на показатели помехоустойчивости ААР7

*Цель эксперимента:* выявление влияния мощности ПАП на эффективность радиоподавления ААР7.

*Условия эксперимента:*

- ААР7 сфокусирована в направлении зенита;
- мощность всех АП, создаваемых ПАП, одинакова и соответствует мощности, измеренной на выходе ИА;
- все ПАП расположены в плоскости  $\varepsilon = 0^\circ$ ;
- ПАП распределены равномерно по окружности с шагом  $(360^\circ/N_{\text{ПАП}})$ , начиная

с  $\beta_1 = -45^\circ$ .

*Результаты эксперимента.*

Результаты расчетов зависимостей КУ ОСП и ВА ОСП ААР7 от мощности АП на выходе ИА и числа  $N_{\text{ПАП}}$  представлены на рисунках 3.16, 3.17.

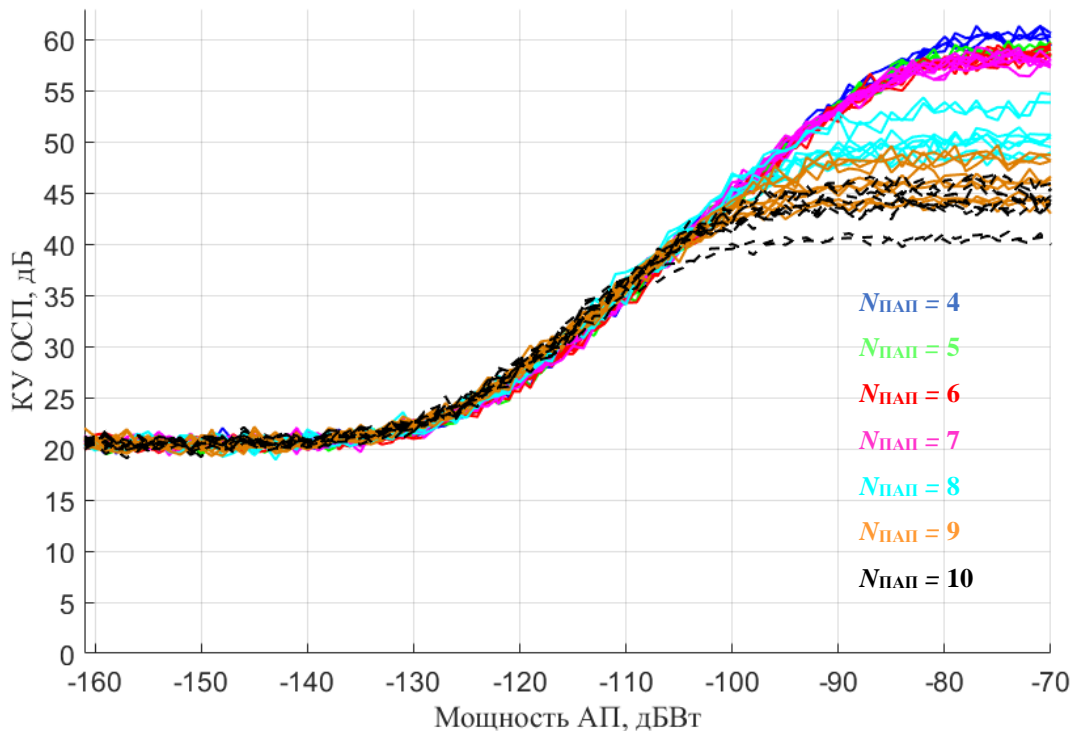


Рисунок 3.16 - Зависимость КУ ОСП ААР7 от мощности АП и  $N_{\text{ПАП}}$

Анализ графиков на рисунке 3.16 показывает, что при уровнях мощности АП, не превышающих мощность СШ приемного канала, КУ ОСП не превышает 23...25 дБ. Рост КУ ОСП наступает при мощности АП (на выходе ИА) на уровне минус 130 дБВт. При этом имеют место существенные особенности для случаев  $N_{\text{ПАП}} \leq 7$  и  $N_{\text{ПАП}} > 7$ .

При  $N_{\text{ПАП}} \leq 7$  увеличение мощности АП больше минус 130 дБВт приводит к пропорциональному росту КУ ОСП. Рост продолжается до уровня 58...60 дБ, который достигается при мощности АП минус 80 дБВт, затем рост прекращается и остается на указанном уровне.

При  $N_{\text{ПАП}} > 7$  прекращение роста КУ ОСП наступает значительно раньше, чем при  $N_{\text{ПАП}} \leq 7$ , а достигаемые уровни КУ ОСП значительно ниже. А именно, при  $N_{\text{ПАП}} = 8, 9, 10$  прекращение роста КУ ОСП наступает при мощности АП приблизительно минус 90 дБВт, минус 95 дБВт, минус 100 дБВт соответственно, при этом достигаемые уровни КУ ОСП составляют приблизительно 53 дБ, 45 дБ, 41 дБ соответственно.



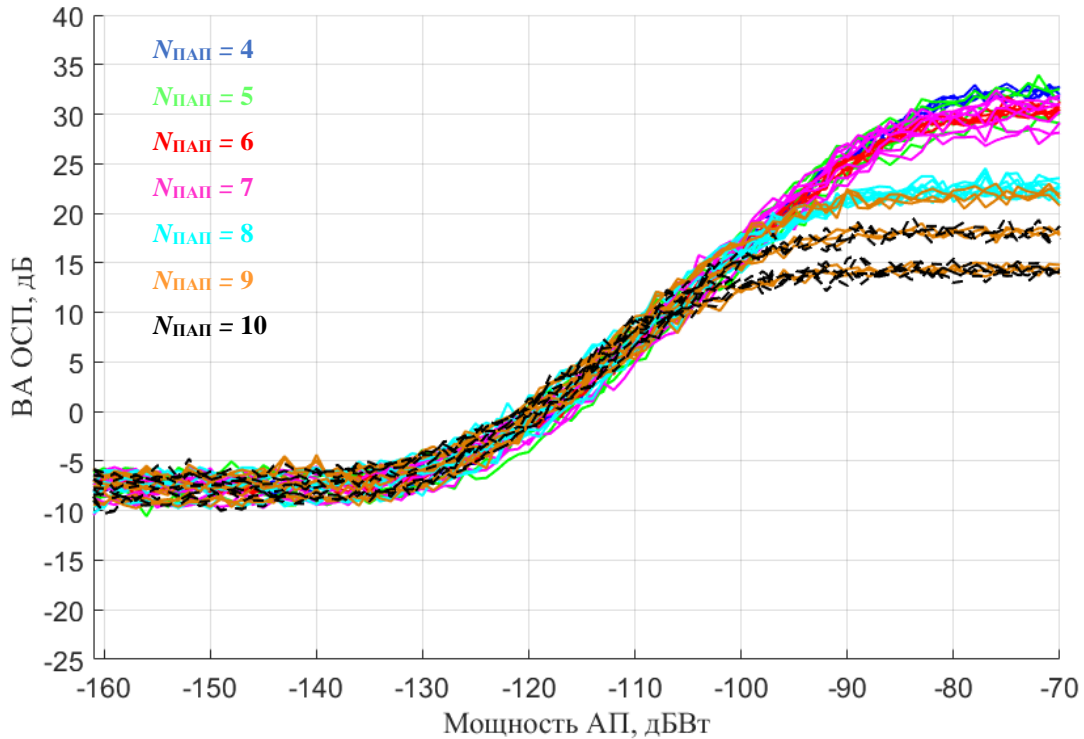


Рисунок 3.17 - Зависимость ВА ОСП ААР7 от мощности АП и  $N_{ПАП}$

Анализ графиков на рисунке 3.17 показывает, что при мощности АП, не превышающей минус 120 дБВт, ВА ОСП несуществен или отсутствует при любом числе  $N_{ПАП}$ . При росте мощности АП сверх указанного уровня имеет место пропорциональное увеличение ВА ОСП, затем рост прекращается. Достигаемые значения ВА ОСП ААР7 при  $N_{ПАП} = 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$  составляют приблизительно 33 дБ, 33 дБ, 31 дБ, 28 дБ, 22 дБ, 17 дБ, 15 дБ. В целом имеет место практически полная корреляция данных, получаемых на основе рисунков 3.16, 3.17.

Таким образом, увеличение мощности ПАП НБ в широком диапазоне (от минус 120 до минус 100 дБВт) приводит к пропорциональному повышению ВА ОСП ААР7. Аналогичный эффект наблюдается и в случае ААР4, однако отличие ААР7 от ААР4 заключается в том, что повышение ВА ОСП ААР7 с ростом мощности АП имеет место при любом числе  $N_{ПАП}$  ПАП НБ.

*Вывод по результатам эксперимента.*

Увеличение мощности ПАП НБ не может привести к значительному повышению эффективности радиоподавления НАП, оснащенной ААР7, при любом количестве  $N_{ПАП}$  для заданных условий приема НС.

### 3.3.3.3 Эксперимент по оценке влияния количества ПАП на показатели помехоустойчивости ААР7

*Цель эксперимента:* выявление влияния количества ПАП на эффективность

радиоподавления ААР7.

*Условия эксперимента:*

- все ПАП расположены в плоскости горизонта;
- все ПАП расставлены по азимуту равномерно в пределах  $360^\circ$ ;
- ААР7 сфокусирована в направлении зенита.

С точки зрения организации радиоподавления НАП представляет интерес оценить влияние количества ПАП на КУ ОСП и ВА ОСП ААР7.

*Результаты эксперимента.*

На рисунках 3.18 представлены в виде семейств графиков результаты расчетов зависимости КУ ОСП и ВА ОСП ААР7, усредненных по всем действующим ПАП, от количества и мощности ПАП.

Анализ графиков показывает, что при  $N_{\text{ПАП}} > 9$  среднее по всем ПАП значение КУ ОСП для мощных АП (минус (100...80) дБВт) достигает уровня 45 дБ, при этом среднее по всем ПАП значение ВА ОСП близко к (15...16) дБ. При  $N_{\text{ПАП}} > 9$  уменьшение мощности АП в интервале от минус 80 до минус 100 дБВт не приводит к пропорциональному уменьшению КУ ОСП.

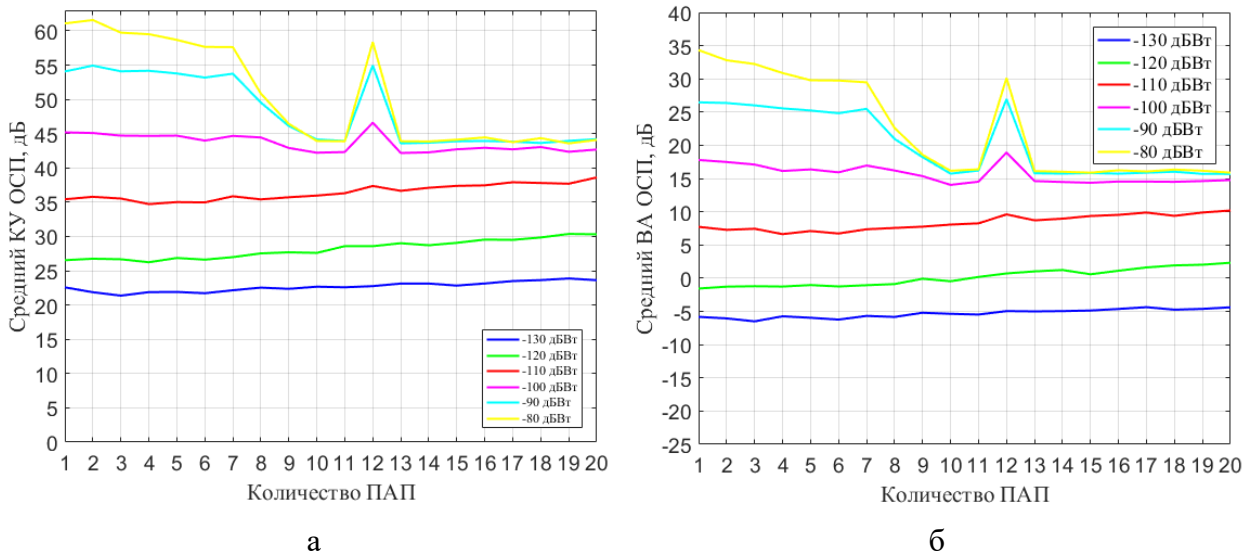


Рисунок 3.18 - Зависимости КУ ОСП (а) и ВА ОСП (б) ААР7 от  $N_{\text{ПАП}}$  и мощности ПАП

Для относительно маломощных АП (минус 130...110 дБВт) значения КУ ОСП и ВА ОСП зависят от  $N_{\text{ПАП}}$  незначительно. А именно, при изменении  $N_{\text{ПАП}}$  от 1 до 20 они меняются не более чем на 5 дБ.

Следует обратить внимание на то, что при мощности АП минус 120 дБВт ВА ОСП незначителен (не превышает 2,5 дБ). Это обстоятельство может быть использовано при обосновании требований к мощности ПАП.

*Вывод по результатам эксперимента.*

Количество ПАП НБ при организации радиоподавления НАП, оснащенной ААР7, следует выбирать с учетом того факта, что ААР7 не обеспечивает ВА ОСП практически при любом числе ПАП, если мощность АП создаваемой каждым ПАП, не превышает минус 120 дБВт, а при мощности минус 110 дБВт величина ВА ОСП не превышает 8...10 дБ. При реализации силового радиоподавления ААР7 количество ПАП НБ должно быть не менее девяти (средний ВА ОСП ААР7 около 15...16 дБ).

### **3.3.3.4 Эксперимент по оценке влияния группирования ПАП по азимуту на характеристики помехоустойчивости ААР7**

*Цель эксперимента:* выявление влияния различных вариантов азимутальной расстановки ПАП на эффективность радиоподавления ААР7.

*Условия эксперимента:*

- все ПАП расположены в плоскости горизонта;
- азимутальный разнос  $\Delta\beta_{\text{ПАП-ПАП}}$  между соседними ПАП одинаков;
- ААР7 сфокусирована в направлении зенита;
- мощность всех АП, создаваемых ПАП, на выходе ИА составляет минус 80 дБВт.

В данном эксперименте рассмотрена зависимость КУ ОСП ААР7 от величины углового разноса  $\Delta\beta_{\text{ПАП-ПАП}}$  соседних ПАП по азимуту, а также от азимутального положения  $\beta_{\text{ПАП1}}$  ПАП<sub>1</sub>.

*Результаты эксперимента.*

На рисунках 3.19 представлены диаграммы КУ ОСП ААР7 для одного из ПАП (ПАП<sub>3</sub>) при воздействии на ААР7 шести (а) и десяти (б) ПАП НБ.

При  $N_{\text{ПАП}} = 6$  и угловом рассогласовании  $\Delta\beta_{\text{ПАП-ПАП}}$  до  $15^\circ$  значение КУ ОСП находится в пределах 60 дБ. При увеличении азимутального разноса  $\Delta\beta_{\text{ПАП-ПАП}}$  значение КУ ОСП уменьшается на 10...15 дБ. Спад коэффициента улучшения на 10...15 дБ объясняется тем, что ААР7 начинает формировать в ДН «кольцевой» провал, глубина которого меньше, чем у «точечных» и вида «яма» и «овраг».

При  $N_{\text{ПАП}} = 10$  и азимутальном разносе соседних ПАП  $\Delta\beta_{\text{ПАП-ПАП}}$ , превышающем  $15...20^\circ$ , КУ ОСП уменьшается до уровня 40...45 дБ. При этом ВА ОСП ААР7 относительно НАР7 не превышает 15...16 дБ. При меньших значениях  $\Delta\beta_{\text{ПАП-ПАП}}$  ААР7 формирует «точечный» провал или провал вида «овраг».

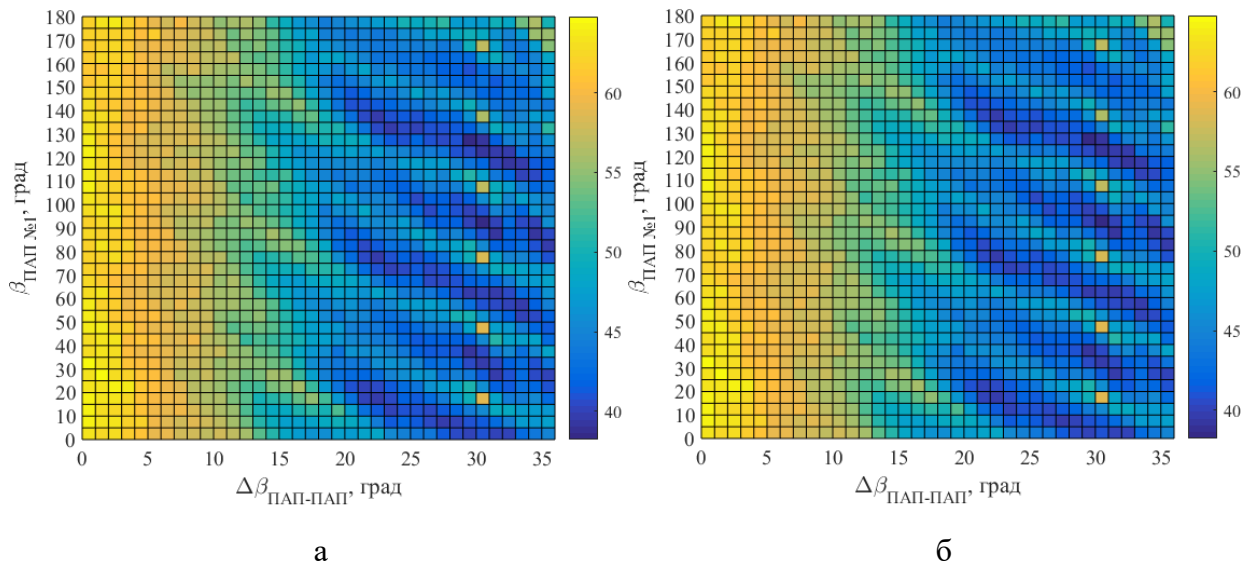


Рисунок 3.19 – Диаграммы КУ ОСП ААР7 в зависимости  $\Delta\beta_{\text{ПАП-ПАП}}$  и  $\beta_{\text{ПАП1}}$  (для ПАП3): а -  $N_{\text{ПАП}} = 6$ , б -  $N_{\text{ПАП}} = 10$

*Вывод по результатам эксперимента.*

Группирование ПАП НБ, сопровождающееся уменьшением азимутального разноса соседних ПАП, приводит к увеличению КУ ОСП ААР7 и, как следствие, к увеличению ВА ОСП ААР7. С точки зрения организации радиоподавления НАП ПАП НБ предпочтительна равномерная расстановка по азимуту ПАП в пределах  $360^\circ$ .

### 3.3.3.5 Группа экспериментов по оценке влияния взаимного углового положения ПАП и рабочего НСЗ на показатели помехоустойчивости ААР7

*Цель экспериментов:* выявление влияния взаимного разноса ПАП и рабочего НСЗ по азимуту и углу места на эффективность радиоподавления ААР7.

*Эксперимент 3.3.3.5.1.*

*Цель эксперимента:* выявление влияния положения ПАП по углу места на показатели помехоустойчивости ААР7.

*Условия эксперимента:*

- $N_{\text{ПАП}} = 7$ ;
- Координаты ПАП сведены в таблицу 3.3.
- ААР7 сфокусирована в направлении зенита.

Таблица 3.3 - Координаты ПАП

Номер ПАП	1	2	3	4	5	6	7
$\beta_{\text{ПАП}},^\circ$	-180	-128,57	-77,14	-25,71	25,71	77,14	128,57
$\varepsilon_{\text{ПАП}},^\circ$	0	0	0	0	0	0	0..90

Иначе говоря, на ААР7 воздействуют шесть ПАП НБ и один ПАП воздушного базирования (ВБ).

*Результаты эксперимента.*

На рисунке 3.20 представлены нормированные ДН ААР7 при воздействии семи ПАП для различных значений  $\varepsilon_{\text{ПАП}7}$ .

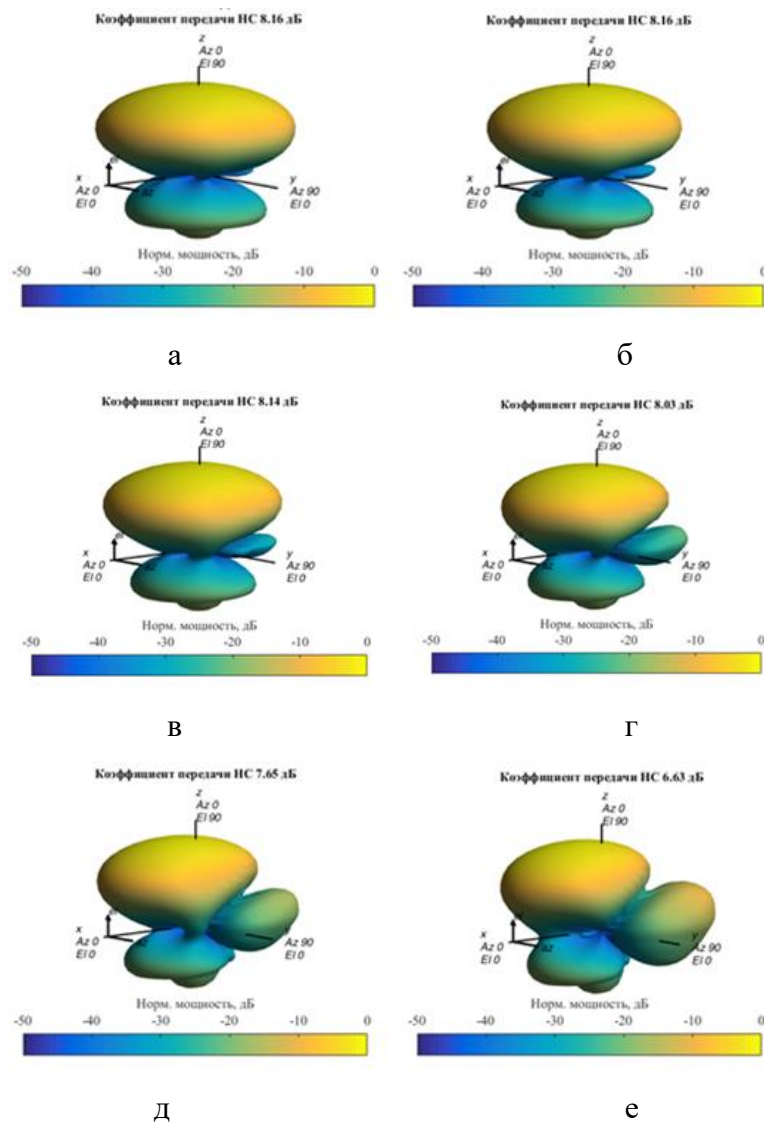


Рисунок 3.20 - Нормированная ДН ААР7 при воздействии семи ПАП: а -  $\varepsilon_{\text{ПАП}7} = 10^\circ$ , б -  $\varepsilon_{\text{ПАП}7} = 20^\circ$ , в -  $\varepsilon_{\text{ПАП}7} = 30^\circ$ , г -  $\varepsilon_{\text{ПАП}7} = 40^\circ$ , д -  $\varepsilon_{\text{ПАП}7} = 50^\circ$ , е -  $\varepsilon_{\text{ПАП}7} = 60^\circ$

С увеличением угла  $\varepsilon_{\text{ПАП}7}$  наблюдается уменьшение КУ ОСП для всех ПАП. В интервале  $\varepsilon_{\text{ПАП}7}$  от 0 до  $20^\circ$  ПАП<sub>7</sub> находится в пределах «кольцевого» провала, поэтому снижение КУ ОСП относительно невелико. При  $\varepsilon_{\text{ПАП}7} > 20^\circ$  ПАП<sub>7</sub> уже вне пределов «кольцевого» провала в ДН ААР7, при этом имеет место резкое снижение КУ ОСП ААР7. Одновременно с этим растет мощность АП, создаваемой ПАП<sub>7</sub>, на выходе всех АЭ, поскольку ПАП<sub>7</sub> действует по главному лепестку ДН НАР7.

Как видно из рисунка 3.21, при  $\varepsilon_{\text{ПАП}7} > 10^\circ$  адаптивный алгоритм ААР7 формирует провалы в ДН ААР7 двух типов: «точечный» в направлении ПАП<sub>7</sub> и «кольцевой» в направлении остальных ПАП НБ.

На рисунках 3.21 представлены семейства графиков зависимостей КУ ОСП и ВА ОСП ААР7 от величины угла  $\varepsilon_{\text{ПАП}7}$ .

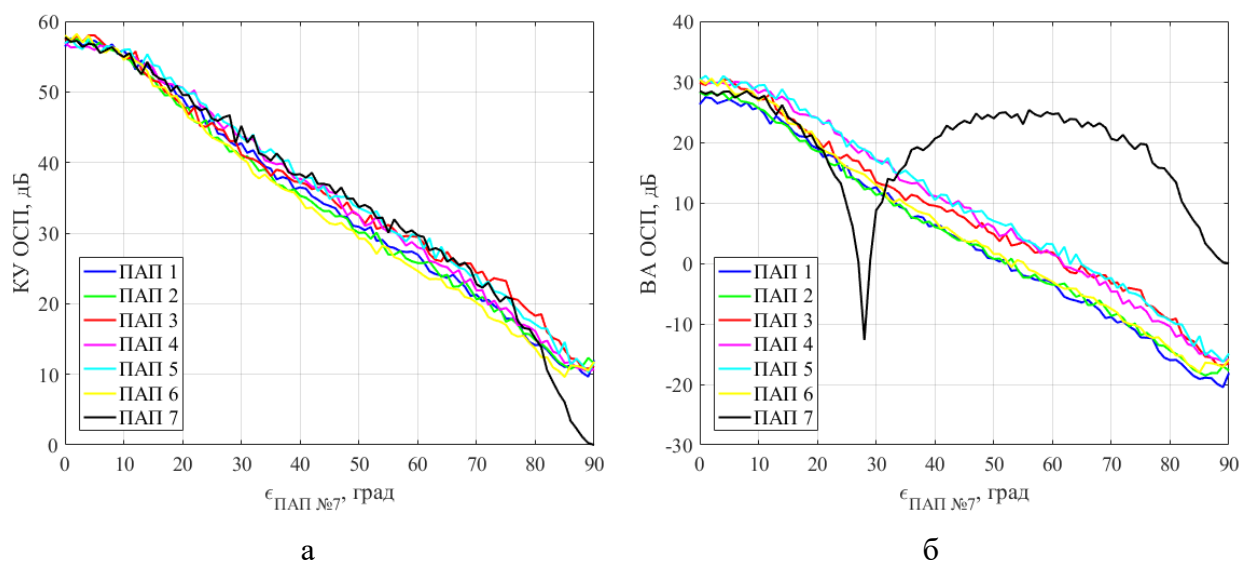


Рисунок 3.21 - Зависимости КУ ОСП (а) и ВА ОСП (б) ААР7 от  $\varepsilon_{\text{ПАП}7}$  при  $N_{\text{ПАП}} = 7$  и мощности АП минус 80 дБВт

При увеличении угла  $\varepsilon_{\text{ПАП}7}$  имеет место практически одинаковое для всех ПАП НБ снижение КУ ОСП и ВА ОСП ААР7. При  $\varepsilon_{\text{ПАП}7} = 90^\circ$  (совпадает с направлением НСЗ) КУ ОСП для ПАП<sub>7</sub> уменьшается до 0 дБ, а для ПАП<sub>1</sub>, ... ПАП<sub>6</sub> до 10 дБ. Одинаковое для всех ПАП уменьшение КУ ОСП с увеличением угла  $\varepsilon_{\text{ПАП}7}$  имеет место благодаря принятой в данном эксперименте равномерной расстановке всех ПАП по азимуту. Резкое уменьшение ВА ОСП, наблюдаемое на рисунке 3.21 (б) в районе  $\varepsilon_{\text{ПАП}7} = 28^\circ$  обусловлено наличием провала в ДН НАР7.

При формировании «кольцевого» провала в ДН ААР7 в направлении шести и более пространственно-распределенных по азимуту ПАП НБ, расположенных в плоскости горизонта, адаптивный алгоритм задействуют все степени свободы ААР, следовательно, дополнительная

помеха, действующая с направления более  $20^\circ$  по углу места, «перегружает» ААР7 подобно тому, как четыре ПАП «перегружают» ААР4. При воздействии шести ПАП, пять из которых расположены на линии горизонта, а ПАП<sub>6</sub> выше горизонта, ААР7 в некоторых ситуациях (при малом угловом азимутальном рассогласовании между сопровождаемым НСЗ и одним из ПАП) «перегружает» ААР7, однако стабильный результат наблюдается только при ПАП больше шести. При воздействии пяти ПАП, четыре из которых расположены на линии горизонта, а пятый выше горизонта, ААР7 эффективно формирует «точечные» провалы в направлении каждого из пяти ПАП.

*Вывод по результатам эксперимента.* Совместная работа одного ПАП ВБ и шести ПАП НБ обеспечивает значительные преимущества при радиоподавлении НАП, оснащенной ААР7.

### Эксперимент 3.3.3.5.2

*Цель эксперимента:* выявить влияние мощности ПАП ВБ на показатели помехоустойчивости ААР7.

*Условия эксперимента:*

- аналогичные эксперименту 3.3.3.5.1.

*Результаты эксперимента.*

На рисунке 3.22 представлены зависимости КУ ОСП (а) и ВА ОСП (б) ААР7 для ПАП<sub>7</sub> от мощности АП, создаваемой ПАП<sub>7</sub>, при разных углах  $\epsilon_{\text{ПАП}7}$ . Мощность АП для ПАП<sub>1</sub>, ПАП<sub>2</sub>, ... ПАП<sub>6</sub> равна минус 80 дБВт (на выходе ИА).

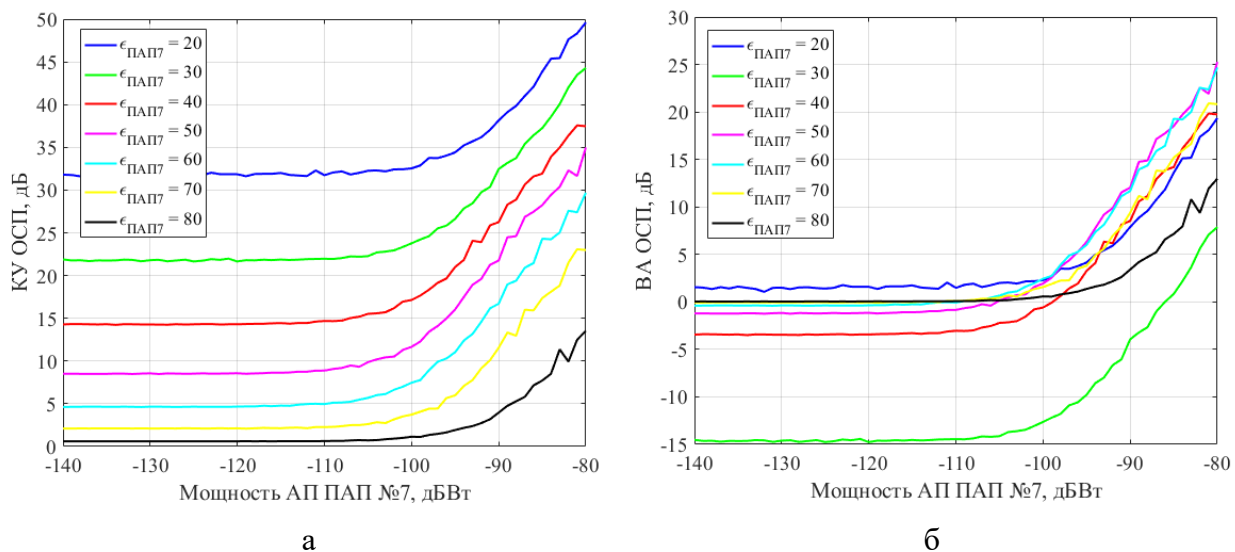


Рисунок 3.22 - Зависимости КУ ОСП (а) и ВА ОСП (б) ААР7 для ПАП<sub>7</sub> от мощности АП, создаваемой ПАП<sub>7</sub>

Анализ графиков на рисунках 3.22 показывает, что КУ ОСП для ПАП<sub>7</sub> сильно зависит от угла места ПАП<sub>7</sub>. Зависимость от мощности АП, создаваемой ПАП<sub>7</sub> на выходе АЭ, слабая вплоть до значений минус 105...100 дБВт. ВА ОСП ААР<sub>7</sub> для ПАП ВБ незначителен при углах  $\epsilon_{\text{ПАП}7} > 20^\circ$  и мощности АП, создаваемой ПАП<sub>7</sub>, не превышающей также минус 105...100 дБВт (больше СШ). Таким образом, размещение ПАП ВБ в верхней полусфере весьма выгодно.

*Вывод по результатам эксперимента.*

Работа одиночного ПАП ВБ совместно с шестью ПАП НБ при радиоподавлении НАП, оснащенной ААР<sub>7</sub>, обеспечивает ПАП ВБ значительные преимущества при углах возвышения над горизонтом не менее  $20^\circ$  и мощности АП, создаваемой этим ПАП ВБ, не более 100 дБВт.

*Эксперимент 3.3.3.5.3.*

*Цель эксперимента:* выявить зависимость показателей помехоустойчивости ААР<sub>7</sub> по отношению к группе ПАП НБ от мощности ПАП ВБ.

*Условия эксперимента:*

- аналогичные эксперименту 3.3.3.5.1.

*Результаты эксперимента.*

На рисунке 3.23 представлена зависимость ВА ОСП ААР<sub>7</sub> для ПАП<sub>2</sub> от мощности АП, создаваемой ПАП<sub>7</sub>, находящимся выше линии горизонта.

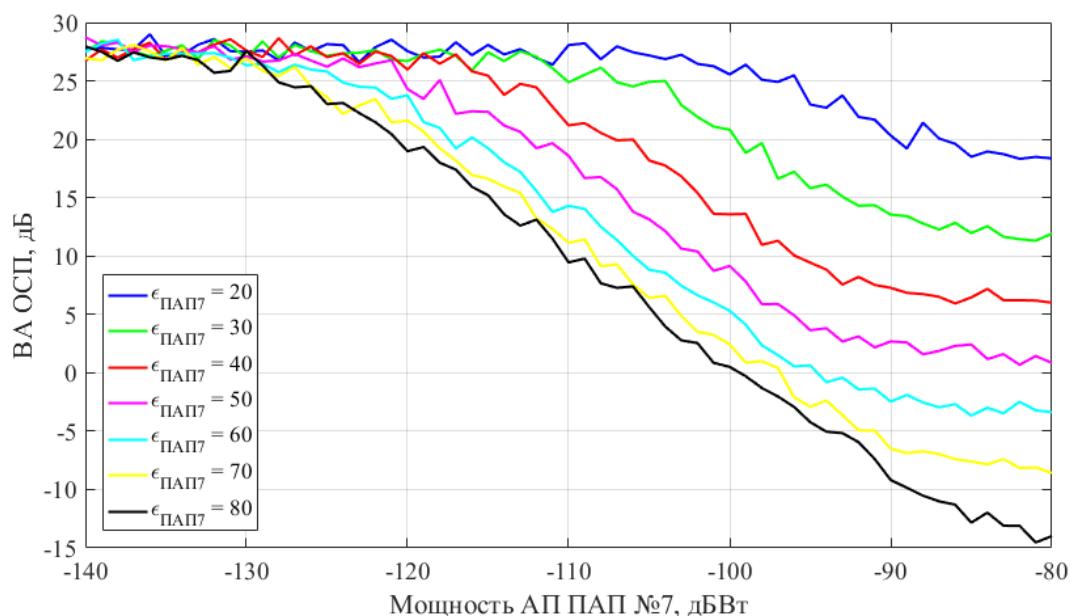


Рисунок 3.23 - Зависимость ВА ОСП ААР<sub>7</sub> для ПАП<sub>2</sub> от мощности АП, создаваемой ПАП<sub>7</sub>

Если на ААР<sub>7</sub> воздействуют пять ПАП, четыре из которых находятся на линии горизонта,



а пятый - выше горизонта, то ААР7 эффективно обрабатывает такую помеховую ситуацию, формируя «точечный» провал в ДН в направлении ПАП<sub>5</sub>. При этом ухудшение условий приема НС рабочего НСЗ будет зависеть от углового рассогласования по азимуту и углу места между ПАП<sub>5</sub> и НСЗ. При воздействии шести ПАП, пять из которых расположены на линии горизонта, а шестой выше горизонта, ААР7 в некоторых ситуациях (при малом угловом азимутальном рассогласовании между сопровождаемым НСЗ и одним из ПАП) «перегружает» ААР7, однако стабильный результат наблюдается при  $N_{\text{ПАП}} > 6$ .

*Вывод по результатам эксперимента.*

При использовании ПАП ВБ совместно с шестью ПАП НБ увеличение эффекта по снижению ВА ОСП ААР7 по отношению к ПАП НБ достигается при увеличении угла места и мощности ПАП ВБ.

#### *Эксперимент 3.3.3.5.4*

*Цель эксперимента:* выявить влияние взаимного разноса ПАП ВБ по углу места на показатели помехоустойчивости ААР7.

*Условия эксперимента:*

- ААР7 сфокусирована в направлении зенита;
- пять и шесть ПАП распределены равномерно по азимуту и расположены выше линии горизонта;
- по углу места все ПАП расставлены с шагом  $\Delta\varepsilon_{\text{ПАП-ПАП}}$ .

*Результаты эксперимента.*

На рисунках 3.24 представлены семейства графиков зависимостей КУ ОСП и ВА ОСП ААР7 от углового разноса соседних ПАП  $\Delta\varepsilon_{\text{ПАП-ПАП}}$  при  $N_{\text{ПАП}} = 5$ . Графики построены для значений мощности АП минус 100 дБВт (штриховая линия) и минус 80 дБВт (сплошная линия).

Таблица 3.4 - Угловое положение ПАП по азимуту

Номер ПАП	1	2	3	4	5
$\beta_{\text{ПАП}},^\circ$	-180	-108	-36	36	108

Как видно из рисунка 3.24, ААР7 эффективно режектирует пять ПАП, равномерно разнесенных по азимуту, при разносе по углу места  $\Delta\varepsilon_{\text{ПАП-ПАП}}$  между соседними ПАП менее  $15^\circ$ . Дальнейшее снижение КУ ОСП вызвано уменьшением коэффициента передачи ААР7 по НС. Увеличение мощности АП приводит к увеличению КУ ОСП, что естественно при  $N_{\text{ПАП}} = 5$  (ААР7 не

находится в состоянии «перегрузки»). Из рисунка 3.24 (б) видно, что ВА ОСП существенно неодинаков для «нижних» и «верхних» ПАП. С увеличением угла места ПАП мощность АП на выходе АЭ увеличивается (воздействие по главному лепестку ДН НАР7), вектор весовых коэффициентов ААР7 адаптируется в сторону режекции более мощных АП, при этом ослабление менее мощных АП, приходящих с меньших углов места (по боковым лепесткам ДН НАР7), ослабевает.

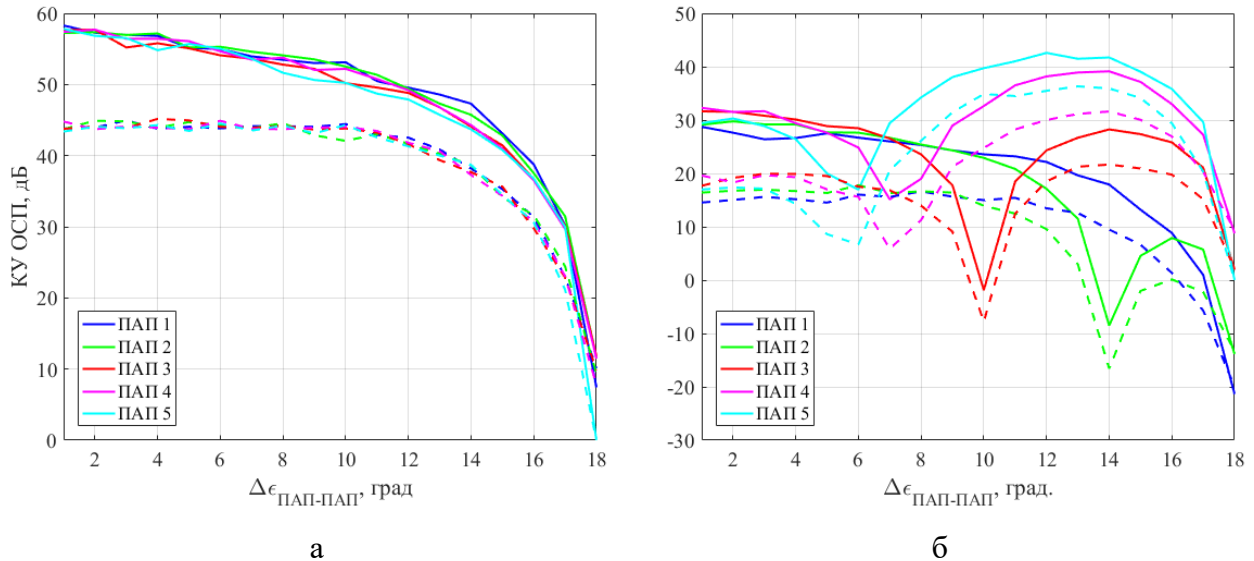


Рисунок 3.24 - Зависимость КУ ОСП (а) и ВА ОСП (б) ААР7 от углового разнosa  $\Delta\epsilon_{\text{ПАП-ПАП}}$  при  $N_{\text{ПАП}} = 5$

На рисунках 3.25 представлены зависимости КУ ОСП (а) и ВА ОСП (б) ААР7 от разнosa соседних ПАП по углу места  $\Delta\epsilon_{\text{ПАП-ПАП}}$ . Количество ПАП  $N_{\text{ПАП}} = 6$ . Мощность АП, создаваемых всеми ПАП, одинакова и равна минус 80 дБ на выходе ИА.

Таблица 3.5 - Угловое положение ПАП по азимуту

Номер ПАП	1	2	3	4	5	6
$\beta_{\text{ПАП}}, ^\circ$	-180	-120	-60	0	60	120

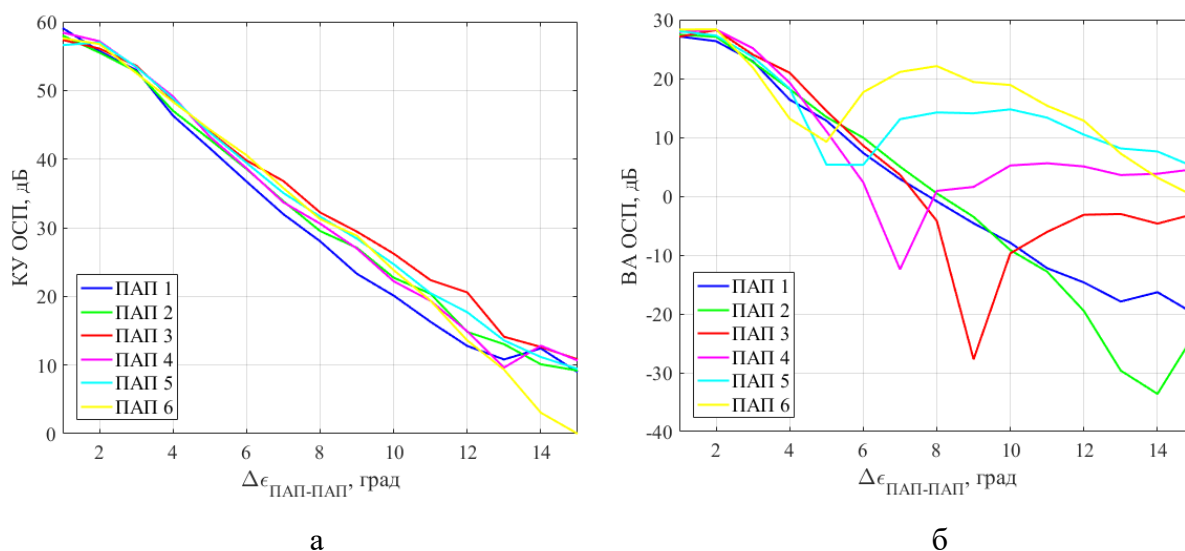


Рисунок 3.25 - Зависимость КУ ОСП (а) и ВА ОСП (б) ААР7 от углового разноса  $\Delta\epsilon_{\text{ПАП-ПАП}}$  при  $N_{\text{ПАП}} = 6$

Из рисунка 3.25 (а) видно, что с увеличением разноса по углу места  $\Delta\epsilon_{\text{ПАП-ПАП}}$  наблюдается небольшое снижение КУ ОСП по всем ПАП в интервале от 1 до 2° (максимальный размах между ПАП<sub>1</sub> и ПАП<sub>6</sub> по углу места равен 12°). Это объясняется тем, что при малых углах места всех ПАП ААР7 формирует «кольцевой» провал. При угловом разносе  $\Delta\epsilon_{\text{ПАП-ПАП}}$  более 3° крутизна спада КУ ОСП по всем ПАП увеличивается, а сформированный «кольцевой» провал деформируется, снижая эффективность ААР7.

Аналогичная зависимость наблюдается при  $N_{\text{ПАП}} > 6$  при заданных параметрах расчета. ВА ОСП для ПАП, расположенных ближе к линии горизонта, уменьшается быстрее, однако средний уровень КУ ОСП остается для всех ПАП приблизительно одинаковым. Важно также отметить, что при уменьшении углового рассогласования между ПАП и НСЗ как по азимуту, так и по углу места эффективность воздействия группы ПАП с верхней полусферы увеличивается.

*Вывод по результатам эксперимента.*

При организации радиоподавления НАП, оснащенной ААР7, ПАП ВБ, распределенными равномерно по азимуту, их расстановка по углу места должна быть такой, чтобы разнос соседних ПАП по углу места  $\Delta\epsilon_{\text{ПАП-ПАП}}$  был не менее 7°.

### 3.3.3.6. Эксперимент по оценке влияния разноса НСЗ и ПАП по азимуту и углу места на характеристики помехоустойчивости ААР7

*Цель эксперимента:* изучить влияние азимутального рассогласования  $\Delta\beta_{\text{ПАП-НСЗ}}$  между одиночным ПАП и НСЗ на характеристики помехоустойчивости ААР7.

*Условия эксперимента:*

- ПАП расположен в плоскости горизонта,  $\varepsilon_{\text{ПАП}} = 0^\circ$ ;

*Результаты эксперимента.*

На рисунках 3.26 приведены зависимости коэффициента передачи ААР7 по НС от углового разнеса  $\Delta\beta_{\text{ПАП-НСЗ}}$  ПАП и НСЗ по азимуту при различных углах возвышения НСЗ  $\varepsilon_{\text{НСЗ}}$  и различных уровнях мощности АП.

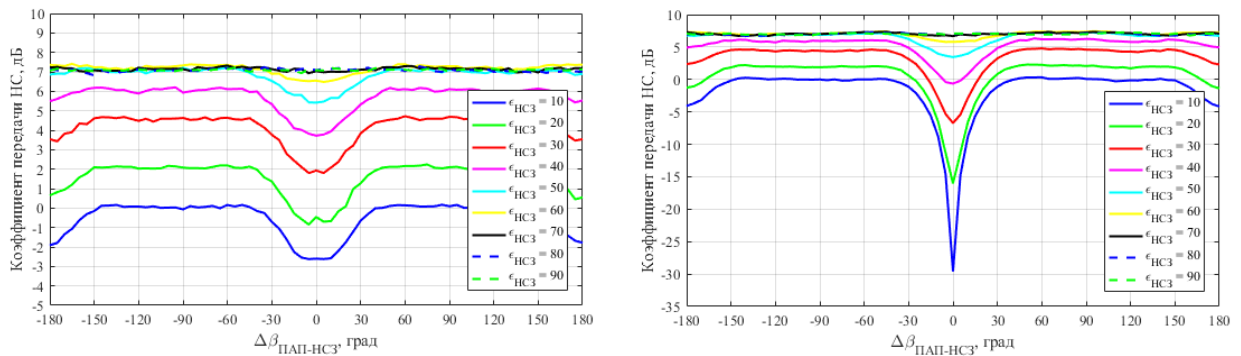


Рисунок 3.26 - Зависимость  $K_{\text{пер НС}}^{(\text{ААР7})}$  от угла  $\Delta\beta_{\text{ПАП-НСЗ}}$  при различной мощности АП: а - минус 80 дБВт, б – минус 120 дБВт

Из рисунков видно, что при малых углах возвышения НСЗ над горизонтом  $K_{\text{пер НС}}^{(\text{ААР7})}$  уменьшается. Для небольших угловых рассогласований ( $\Delta\beta_{\text{ПАП-НСЗ}} = \pm 30^\circ$  и  $\varepsilon_{\text{НСЗ}}$  от 10 до  $60^\circ$ ) наблюдается ухудшение условий приема НС (уменьшение  $K_{\text{пер НС}}^{(\text{ААР7})}$ ) при мощности АП больше СШ. При этом видно, что рост мощности АП влияет только на глубину провала ДН в направлении ПАП, а область ухудшения условий приема НС практически не изменяется.

*Вывод по результатам эксперимента.*

Взаимное угловое положение ПАП и НСЗ сильно влияет на условия приема НС и чем меньше угловое рассогласование между ними, тем эффективней подавляются полезные НС.

### 3.3.3.7 Эксперимент по оценке влияния положения НСЗ по углу места на характеристики ААР7 и условия приема НС

*Цель эксперимента:* выявление влияния угла места НСЗ на характеристики ААР7 и условия приема НС при воздействии семи ПАП с линии горизонта.

*Условия эксперимента:*

- семь ПАП расставлены равномерно по азимуту в плоскости горизонта;
- НСЗ находится выше  $10^\circ$  над горизонтом;
- мощность всех ПАП одинакова и равна минус 80 дБВт (на выходе ИА);
- ААР7 сфокусирована в направлении НСЗ.

*Результаты эксперимента.*

На рисунках 3.27 представлены нормированная ДН ААР7, сфокусированной в направлении НСЗ, при различных углах места  $\varepsilon_{НСЗ}$ .

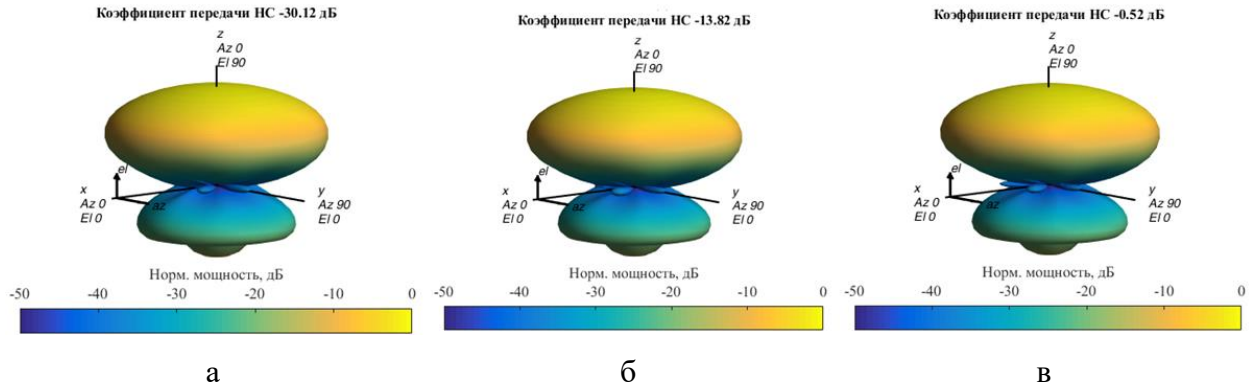


Рисунок 3.27 - Нормированная ДН ААР7, сфокусированной в направлении НСЗ, при различных углах места  $\varepsilon_{НСЗ}$  и  $N_{ПАП} = 7$ : а -  $\varepsilon_{НСЗ} = 10^\circ$ , б -  $\varepsilon_{НСЗ} = 30^\circ$ , в -  $\varepsilon_{НСЗ} = 50^\circ$

Из рисунков видно, что сформированный «кольцевой» провал в ДН ААР7, как отклик на воздействие семи разнесенных по азимуту ПАП НБ, значительно ухудшает условия сопровождения и обнаружения «низколетящих» НСЗ при  $\varepsilon_{НСЗ}$  от  $10^\circ$  до  $50^\circ$ . Коэффициент передачи ААР7 по НС снижается до минус 30 дБ, минус 13 дБ, минус 0,52 дБ при углах места  $\varepsilon_{НСЗ}$   $10^\circ$ ,  $30^\circ$  и  $50^\circ$  соответственно. Улучшение условий обнаружения и сопровождения НС (коэффициент передачи НС становится больше единицы) наблюдается только при  $\varepsilon_{НСЗ}$  более  $50^\circ$ .

Например, при воздействии на ААР7 не менее девяти ПАП НБ и при сопровождении НСЗ, находящегося на возвышении  $10^\circ$ ,  $20^\circ$  и  $30^\circ$  по углу места, КУ ОСП на выходе ААР7 составляет не более 9, 15 и 24 дБ соответственно, в то время как для НСЗ, находящегося в зените, КУ ОСП на выходе ААР7 составляет до 45 дБ.

*Вывод по результатам эксперимента.*

Создание «кольцевого» провала ААР7 приводит к ослаблению НС «низколетящих» НСЗ на 10...30 дБ при углах места менее  $30^\circ$ . Коэффициент передачи ААР7 по НС становится положительным только при углах места сопровождаемых НСЗ более  $50^\circ$ . Поэтому задачи радиоподавления ААР7 с помощью ПАП НБ легче решаются при работе НАП с НСЗ, расположенными на малых углах места. Ухудшение условий приема «низколетящих» НСЗ (углы места менее  $30^\circ$ ) также создает предпосылки для создания интеллектуальных радиопомех.

### 3.3.3.8 Эксперимент по оценке влияния динамики обстановки на характеристики помехоустойчивости ААР7

Как и в случае ААР4, с точки зрения оценки влияния динамики обстановки на характеристики помехоустойчивости ААР7 целесообразно выяснить длительность процесса адаптации, то есть, время, требуемое для формирования ДН требуемой формы (с провалами в направлениях ПАП). Это время определяет динамические характеристики ААР, то есть способность адаптироваться к изменяющейся помеховой обстановке.

В данном эксперименте как и в случае ААР4, время, требуемое на адаптацию, оценивается на основе зависимости КУ ОСП ААР7 от объема выборки входного процесса  $K$  при воздействии на ААР7 одиночного ПАП. При расчетах принято, что ПАП расположен в плоскости горизонта, азимут  $\beta_{\text{ПАП}} = -45^\circ$ , угол места  $\varepsilon_{\text{ПАП}} = 0^\circ$ , при этом ААР7 сфокусирована в направлении зенита.

*Результаты эксперимента.*

Семейство графиков зависимости КУ ОСП ААР7 от объема выборки  $K$ , на основе которой определяются выборочная корреляционная матрица помех и оптимальный весовой вектор ААР7, представлено на рисунке 3.28.

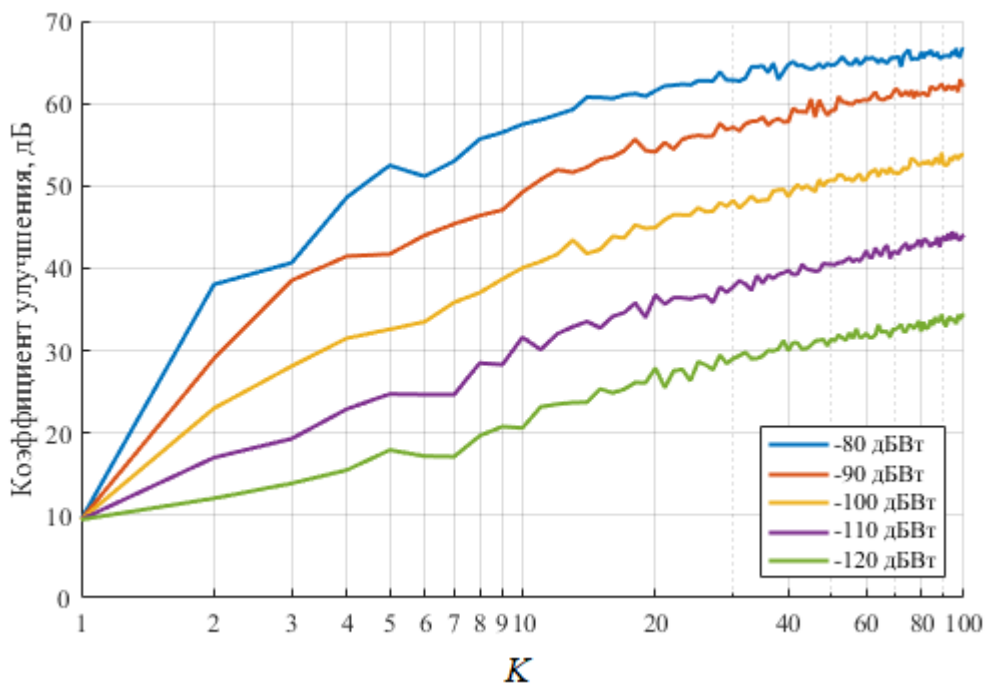


Рисунок 3.28 - Зависимость КУ ОСП ААР7 от объема выборки входного процесса  $K$  при  $N_{\text{ПАП}} = 1$

Сравнение результатов для ААР7 и ААР4 (рисунки 3.13 и 3.28) показывает, что для достижения уровня минус 3 дБ относительно оптимального требуется больший объем выборки входного процесса для ААР7, при этом достигаемый уровень КУ ОСП для ААР7 выше, чем для

ААР4. Как и в случае ААР4, при уменьшении мощности АП требуется большее значение  $K$  для достижения требуемого значения КУ ОСП. Следовательно, при меньшей мощности помехи для завершения адаптации требуется большее время. С другой стороны, если объем выборки  $K$  оставить прежним (как и при относительно мощной помехе), то снизится точность оценки корреляционной матрицы помехи и, как следствие, уменьшится достигаемый КУ ОСП. С учетом сказанного, при организации радиоподавления НАП, оснащенной ААР7, следует уменьшать мощность АП до некоторого уровня достаточного для подавления НАП. При этом время, затрачиваемое на обновление вектора весовых коэффициентов, будет увеличиваться. При проведении всех рассмотренных выше экспериментов было выбрано значение объема выборки входного процесса  $K = 20$ .

Как следует из сравнения графиков на рисунках 3.13 и 3.28, время адаптации ААР7 приблизительно в три раза превышает аналогичное время ААР4 (при мощности АП минус 80 дБВт). Следовательно, при  $K = 20$  время адаптации ААР7 составляет около 100 мкс. В перспективе с повышением производительности цифровой техники время адаптации может быть уменьшено до единиц мкс. Именно это время определяет динамические характеристики ААР7.

*Выводы по результатам эксперимента.*

1. Динамические характеристики ААР7 определяются величиной времени адаптации, которое для перспективных образцов НАП составляет (единицы ... десятки) мкс (порядка 100 мкс и менее).
2. При значениях времени адаптации, составляющих (единицы...десятки) мкс, практически отсутствует влияние динамики перемещения носителей НАП на эффективность адаптации ААР7.
4. При организации радиоподавления НАП, оснащенной ААР7, путем создания «мерцающих» радиопомех, период мерцаний ПАП должен быть меньше указанной величины времени адаптации. То есть, потребуется излучение мерцающей АП с периодом мерцаний порядка единиц микросекунд.

### **3.4 Предложения по рациональному построению противонавигационного поля радиопомех при противодействии навигационной аппаратуры потребителей, оснащенной адаптивными антенными решетками**

Организация радиоподавления НАП с учетом наличия в ее составе средств ПЗ, построенных на базе ААР, является сложной задачей как с точки зрения построения ПНПР с рациональной конфигурацией, так и его поддержания в стабильно рабочем состоянии. Сказанное относится к

ПНПР, ориентированным на решение всех основных задач противодействия НАП СРНС, какими являются:

- противодействие спутниковой навигации опасных объектов (террористов, разведывательных и ударных беспилотных летательных аппаратов и др.);
- защита объектов от средств разведки и поражения, использующих НАП СРНС (объектовая защита);
- задач защиты территории (создание протяженных сплошных зон радиоподавления с целью защиты множества объектов);

Варианты построения ПНПР, удовлетворяющие требованиям различных решаемых задач, могут быть реализованы с использованием:

- только ПАП НБ (относительно простой, но энергозатратный способ организации ПНПР);
- только ПАП ВБ (технически более сложный, но менее энергозатратный способ);
- различных комбинаций ПАП НБ и ВБ (способ, компромиссный как с точки зрения сложности реализации, так и требований к энергетике ПАП).

#### **3.4.1 Построение противонавигационного поля радиопомех на базе постановщиков активных помех наземного базирования**

Постановщики активных помех НБ, как правило, воздействуют на НАП с направления горизонта или ниже его. Если подавляемая НАП оснащена ААР4, то для значительного снижения ее эффективности необходимо в каждой точке ПНПР обеспечить воздействие на подавляемую НАП не менее четырех ПАП НБ с равномерной расстановкой по азимуту, при этом обеспечивается практически «перегруженное» состояние ААР4, при котором средний ВА ОСП ААР4 в направлении ПАП НБ несущественен 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 10 дБ. Требования к энергетике каждого ПАП необходимо предъявлять с учетом значений КУ ОСП «перегруженной» ААР4, который может достигать 20...30 дБ и более в направлении ПАП НБ. При наличии в составе НАП ААР7 требования к энергетике ПАП НБ существенно возрастают. Это вызвано особенностью конфигурации ААР7. Применение ААР7 эффективно на носителях ВБ (самолеты, БЛА и др). 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). Значительное снижение помехозащитной эффективности (глубины «кольцевого» провала в ДН) ААР7 путем воздействия на нее ПАП НБ возможно при наличии не менее девяти ПАП 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. Для «низколетящих» НСЗ с углами места относительно ААР7 от 10 до 30° КУ ОСП ААР7 снижается до 9...24 дБ за счет создаваемого «кольцевого» провала.

Применение ПАП НБ возможно при решении всех перечисленных выше задач. Однако при использовании только ПАП НБ необходимо учитывать высокие требования к энергетике ПАП, что обусловлено низкими уровнями боковых лепестком ДН НАР4 и НАР7, а также наличием ВА ОСП: до 5 дБ в случае ААР4 (при равномерной азимутальной расстановке не менее четырех ПАП) и не менее 15 дБ в случае ААР7 (при равномерной азимутальной расстановке не менее девяти ПАП).

### **3.4.2 Построение противонавигационного поля радиопомех на базе постановщиков активных помех воздушного базирования**

Применение ПАП ВБ, находящихся выше линии горизонта относительно платформы НАП, а также 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 диаграммы направленности ААР (ААР4 и ААР7), что существенно снижает (более 20 дБ) требования к энергетике отдельного ПАП.

Во-вторых, существует конечная вероятность «затенения» сопровождаемых НСЗ при малых угловых рассогласованиях с ПАП ВБ.

В-третьих, эффективное радиоподавления 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 (менее 20°) ААР7 может сформировать «кольцевой» провал в ДН и существенно ослабить действующие на нее АП.

Существенным недостатком организации ПНПР на базе ПАП ВБ является сложность технической реализации. Применительно к задаче защиты территории реализация сценария с использованием только ПАП ВБ является, по-видимому, спорным решением. Что касается решения задач защиты объекта и противодействия опасным объектам, то в краткосрочной перспективе данный способ может быть востребован. При этом важное значение имеет наличие информации о местоположении объекта радиоподавления.

### 3.4.3 Построение противонавигационного поля радиопомех на базе постановщиков активных помех наземного и воздушного базирования

Комбинированный вариант построения ПНПР с использованием ПАП НБ и ВБ дает синергетический эффект, который заключается во взаимном усилении положительных качеств каждого из этих способов. Существенно следующее.

Во-первых, реализация относительно мощных пространственно-распределенных ПАП НБ необходима для использования всех степеней свободы ААР7 (либо ААР4). При этом количество равномерно распределенных по азимуту 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 относительно маломощных ПАП ВБ в малом количестве (хотя бы один), действующих по главному лепестку ДН ААР, при достаточном возвышении над горизонтом (более  $10^\circ$ ), способно существенно снизить помехозащитную эффективность ААР7 или ААР4 (ВА ОСП для ПАП НБ).

Синергетический эффект от взаимодействия группы ПАП НБ и не менее одного маломощного ПАП ВБ создает такие условия для ААР7, при которых количество ПАП становится равным числу степеней свободы ААР7, что не достигается при воздействии только ПАП НБ. С учетом этого, при «перегрузке» ААР7 выигрыш за счет адаптации для мощных ПАП НБ значительно снижется, а в случае воздействия на ААР7 шести равномерно распределенных по азимуту ПАП НБ и одного ПАП ВБ с углом места более  $50^\circ$  ВА ОСП ААР7 для некоторых ПАП НБ отсутствует.

ПАП ВБ может располагаться в центре конфигурации наземных ПАП (например, расстановки вида «квадрат» или «шестиугольник»).

Применение относительно небольшого числа ПАП ВБ позволяет снизить сложность реализации ПНПР, а также уменьшить требуемые энергозатраты. Применение комбинированного наземно-воздушного ПНПР целесообразно при решении задач объектово-территориальной защиты.

### 3.5 Выводы по разделу 3

1. «Перегрузка» ААР4 или максимальное снижение ее эффективности достигается при воздействии не менее четырех ПАП НБ, равномерно распределенных по азимуту, при этом средний ВА ОСП ААР4 в направлении ПАП НБ отсутствует. В частности, при воздействии пяти,

шести и семи ПАП НБ с взаимным азимутальным рассогласованием не менее, соответственно,  $26^\circ$ ,  $21^\circ$  и  $17^\circ$  достигается гарантированное снижение ВА ОСП ААР4 для НСЗ, находящегося в зените, до 10 дБ и менее, при этом среднее КУ ОСП лежит в интервале от 26 до 38 дБ.

2. «Перегрузка» ААР7 при воздействии только ПАП НБ невозможна. Максимальное снижение эффективности ААР7 при воздействии только ПАП НБ достигается при общем количестве равномерно распределенных по азимуту ПАП НБ не менее девяти, при этом КУ ОСП ААР7 составляет не менее 40 дБ, а ВА ОСП ААР7 не менее 15 дБ.

3. Воздействие не менее шести равномерно распределенных по азимуту ПАП НБ на ААР7 создает «кольцевой» провал в ДН ААР7, который значительно ослабляет как ПАП НБ, так и все «низколетящие» НСЗ с углами места менее  $50^\circ$ , при этом коэффициент передачи ААР7 в направлении сопровождаемого НСЗ становится меньше 0 дБ и падает до уровня минус 30 дБ для НСЗ с углом места  $10^\circ$ .

4. При воздействии не менее шести равномерно распределенных по азимуту ПАП ВБ на ААР7 снижение ее эффективности увеличивается с ростом взаимного рассогласования по углу места, а «перегрузка» ААР7 происходит при взаимном рассогласовании по углу места более  $7^\circ$ , при этом ВА ОСП ААР7 для некоторых ПАП ВБ отсутствует.

5. Снижение эффективности ААР7 также достигается при одновременном воздействии не менее шести равномерно распределенных по азимуту ПАП НБ и не менее одного ПАП ВБ, при этом угол места ПАП ВБ должен быть более  $10^\circ$ , при угле места ПАП ВБ не менее  $40^\circ$  ВА ОСП ААР7 снижается до 6...10 дБ, а при угле места ПАП ВБ более  $50^\circ$  ВА ОСП ААР7 в направлении некоторых ПАП НБ отсутствует.

6. Воздействие ПАП ВБ по главному лепестку ДН ААР значительно снижают требования к энергетике отдельного ПАП. При углах места ПАП ВБ более  $30^\circ$  снижение КУ ОСП ААР4 составляет более 20 дБ по сравнению с ПАП НБ при одинаковой мощности.

## 4 ОЦЕНКА ЗОН РАДИОПОДАВЛЕНИЯ НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ, ОСНАЩЕННЫХ АДАПТИВНЫМИ АНТЕННЫМИ РЕШЕТКАМИ

### 4.1 Имитационная модель сценария радиоподавления навигационной аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем

Компьютерная имитационная модель сценария радиоподавления НАП СРНС Pole.m предназначена для оценки зон радиоподавления НАП, в том числе оснащенной ААР, с помощью пространственно-распределенных ПАП (далее постов радиопомех (ПРП)) с произвольной конфигурацией. Разработанная КИМ может быть использована в интересах оценки эффективности существующих ПРС РЭБ («Поле-21Э», «Оптим-3.2» и др.), а также других комплексов РЭБ, предназначенных для противодействия НАП СРНС.

В КИМ реализована структура многоканального приемника с ААР, позволяющая формировать максимумы ДН в направлении НСЗ и провалы в направлении ПАП в каждом канале сопровождения НСЗ независимо друг от друга [26]. Структурная схема многоканальной НАП с ААР приведена на рисунке 4.1.

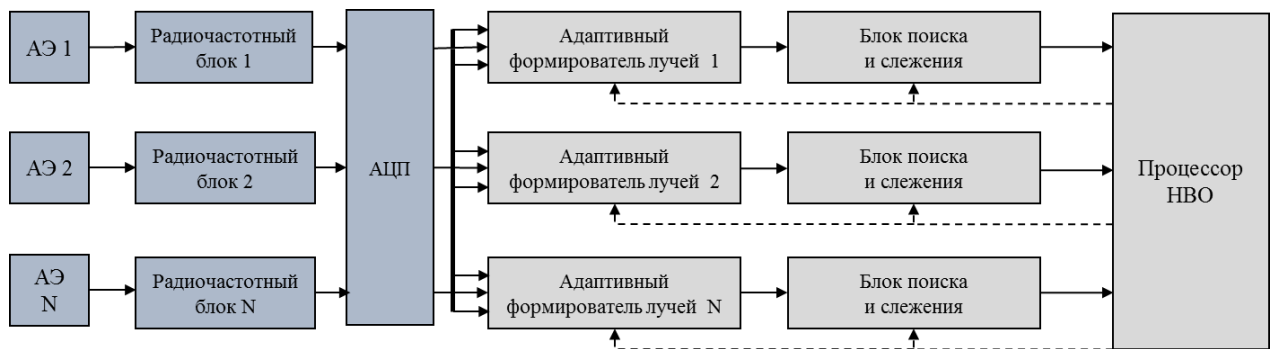


Рисунок 4.1 - Структурная схема многоканальной НАП с ААР

Структурная схема КИМ приведена на рисунке 4.2. Программа разработана в Matlab и выполнена в виде вызываемого графического окна с элементами управления.

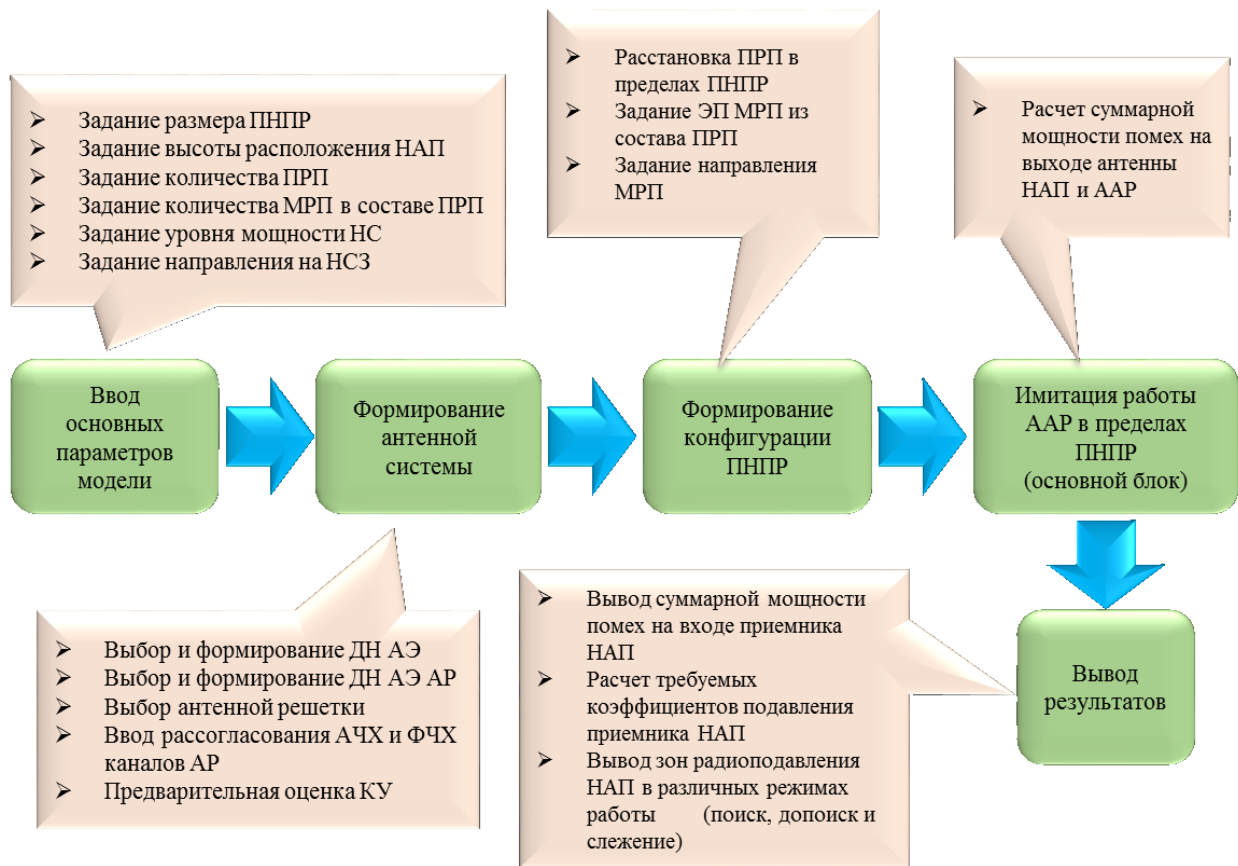


Рисунок 4.2 - Структурная схема КИМ сценария радиоподавления НАП СРНС

Разработанная КИМ сценария радиоподавления НАП СРНС позволяет построить зоны РП НАП СРНС с учетом следующих параметров:

- наличия средств ПЗ: ААР4 или ААР7;
- неидентичности характеристик компенсационных каналов АР;
- ДН антенного элемента НАП или антенной решетки;
- произвольного расположения ПРП;
- произвольного количества модулей радиопомех (МРП) в составе каждого ПРП;
- ДН МРП;
- энергопотенциала МРП;
- пространственной ориентации каждого МРП из состава ПРП по углу места и азимуту;
- высоты пролета носителя НАП;
- наличие прямой видимости между НАП и каждым МРП;
- различных показателей качества подавления в режиме поиска, допоиска и слежения (изложенных в разделе 2), модуляции помеховых сигналов, а также условия необнаружения (срыва слежения) заданного количества НСЗ.

Далее рассматриваются несколько типов конфигураций ПНПР с учетом полученных рекомендаций (изложенных в разделе 2 и 3) для оценки зон РП НАП СРНС, оснащенной ААР4 и ААР7.

#### **4.2 Эксперимент по определению зон радиоподавления навигационной аппаратуры потребителей**

Модельный эксперимент проводится с использованием КИМ сценария радиоподавления НАП СРНС Pole.m, разработанной в рамках данной работы. КИМ включает в себя как составную часть – КИМ ААР ААР.m. Результаты экспериментов с КИМ ААР.m описаны выше в разделе 3.

Объектами модельного эксперимента являются:

- КИМ объекта радиоподавления – НАП, содержащая ААР4 и ААР7;
- КИМ сценария радиоподавления НАП СРНС – пространственно-распределенная система постов радиопомех.

Цель компьютерного эксперимента – получение оценок зон РП НАП, оснащенной ААР, в условиях воздействия пространственно-распределенных ПРП, определение максимального допустимого расстояния между ПРП, при котором решаются задачи срыва слежения, допоиска и поиска НС для снижения затрат на создание ПНПР, создаваемого на базе МРП с типовыми характеристиками. Результаты данного раздела опубликованы в работе [56].

##### **4.2.1 Общие параметры модельного эксперимента**

Рассматриваются три варианта создания ПНПР с помощью расстановки ПРП на местности:

- расстановка ПРП вида «квадрат»;
- расстановка ПРП вида «квадрат» с барьерной зоной;

Объектом радиоподавления является НАП, работающая на частоте 1575,42 МГц одновременно с несколькими сигналам СРНС GPS: C/A, P(Y), M, L1C<sub>d</sub>, L1C<sub>p</sub>. Запись «Зоны РП НАП с ААР4(7)» без дополнительных условий будет означать, что на рисунке отображается совокупная зона РП всех НС GPS на частоте L1, которая, в основном, будет определяться наиболее помехозащищенным сигналом для выбранной АП, а также критерием радиоподавления НАП. Критерий радиоподавления НАП – количество одновременно сопровождаемых (обнаруженных) НСЗ не более «двух из восьми».

Для отображения зоны РП НАП в различных режимах ее работы (поиск, допоиск, слежение) в КИМ приняты следующие обозначения:

- красная область отображает зону срыва слежения за фазой НС (прекращение решения навигационной задачи);
- голубая – предотвращение успешной процедуры допоиска НС после срыва слежения;
- желтая – предотвращение процедуры поиска НС;
- зеленая – НАП нормально функционирует и получает НВО.

В качестве средств ПЗ НАП используются ААР4 и ААР7, рассмотренные в разделе 3. Критерий адаптации – минимизация мощности выходного шума при линейном ограничении ДН.

НАП осуществляют независимую фокусировку ДН в направлении до восьми НСЗ, угловые координаты которых относительно платформы ААР приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Координаты НСЗ

Номер НСЗ	1	2	3	4	5	6	7	8
$\beta_{НСЗ}, ^\circ$	45	135	-135	60	15	-50	-90	70
$\varepsilon_{НСЗ}, ^\circ$	60	20	15	10	25	30	15	10

Достижимое значение КУ ОСП на выходе ААР4 в направлении до трех наземных ПРП – не более 56 дБ, а для ААР7 в направлении до шести наземных ПРП – не более 56 дБ.

В качестве помехового сигнала рассматриваются:

- заградительная шумовая помеха (ЗШП) с равномерной СПМ в полосе 30 МГц (перекрывающая спектры всех НС СРНС GPS на частоте L1);
- сумма сигналоподобных помех (ССП) с распределением мощности между компонентами: 9,6% - BPSK(1), 28,8 % - BPSK(10), 57,7 % - BOCsin(10,5), 1,95 % - BOC(1,1), 1,95 % - TМВОС(6,1,1/11);
- помеха с модуляцией BPSK(1).

Количество МРП в составе каждого ПРП – 3.

При расчетах используется МРП, аналогичный типовым образцам [58,59], со следующими характеристиками:

- несущая частота помехового сигнала 1575,42 МГц;
- ДН в горизонтальной плоскости - 120 град.;
- ДН в вертикальной плоскости - 20 град.;
- поляризация излучения – вертикальная;
- энергопотенциал в максимуме ДН - 1000 Вт.

Высота пролета НАП с ААР равна 200 и 1000 метров. Направление перемещения подавляемой НАП – 15 град.

Модули радиопомех расположены и направлены по азимуту с шагом 120 град. и наклоном по углу места +10 град. Высота расположения ПРП над поверхностью Земли – 30 м.

При расчете коэффициентов подавления для различных режимов работы НАП были использованы следующие показатели качества подавления:

- режим поиска: вероятность необнаружения НС3 0.95, время необнаружения НС3 300 с, критерий «5 из 8»;
- режим допоиска: вероятность необнаружения НС3 0.95, время необнаружения НС3 60 с, критерий «5 из 8»;
- режим слежения: вероятность срыва слежения за фазой НС 0.95, время срыва слежения 1 с, параметр  $p = 3$ .

Класс носителя НАП – низкодинамичный.

Тип приемника НАП – когерентный (слежение за несущей).

Шаг расчета в КИМ был выбран 5 км.

#### **4.2.2 Оценка зон радиоподавления навигационной аппаратуры потребителей с четырехэлементной адаптивной антенной решеткой для конфигурации противонавигационного поля радиопомех с расстановкой вида «квадрат»**

При решении задач объектово-территориальной защиты для создания ПНПР может потребоваться достаточно большое количество ПРП, что несет в себе существенные затраты ресурсов как энергетических, так и технических. Минимизации затрат ресурсов на создание ПНПР можно добиться несколькими путями:

- поиск оптимальной конфигурации ПНПР при решении конкретной задачи объектово-территориальной защиты с учетом особенностей функционирования средств ПЗ НАП;
- учет особенностей функционирования режимов работы НАП в режиме слежения, поиска и допоиска НС – разделение ПНПР на две части: кластер ПРП для создания барьерной зоны на границе ПНПР, где обеспечивается срыв слежения за параметрами НС, и кластер ПРП для защиты сегмента защищаемой территории, где обеспечивается предотвращение поиска или допоиска НС после срыва слежения. Для реализации предотвращения поиска или допоиска НС после срыва слежения требуется существенно меньшая мощность АП на входе приемника НАП. Снижение требуемой мощности АП на входе приемника НАП для заданных показателей качества подавления по сравнению со срывом слежения достигает 11.8 и 7 дБ для поиска и допоиска соответственно.

В качестве примера рассмотрим конфигурацию ПНПР с расстановкой ПРП вида «квадрат». На рисунках 4.3 и 4.4 приведены сечения зон РП НАП с ААР4 на высотах 200 м и 1000 м



при воздействии ЗШП. Расстояние между ПРП составляет от 30 до 60 км. Дальность прямой видимости с учетом того, что ПРП расположены на высоте 30 м, а движение НАП осуществляется на высоте 200 и 1000 м, составляет около 70 и 132,4 км соответственно.

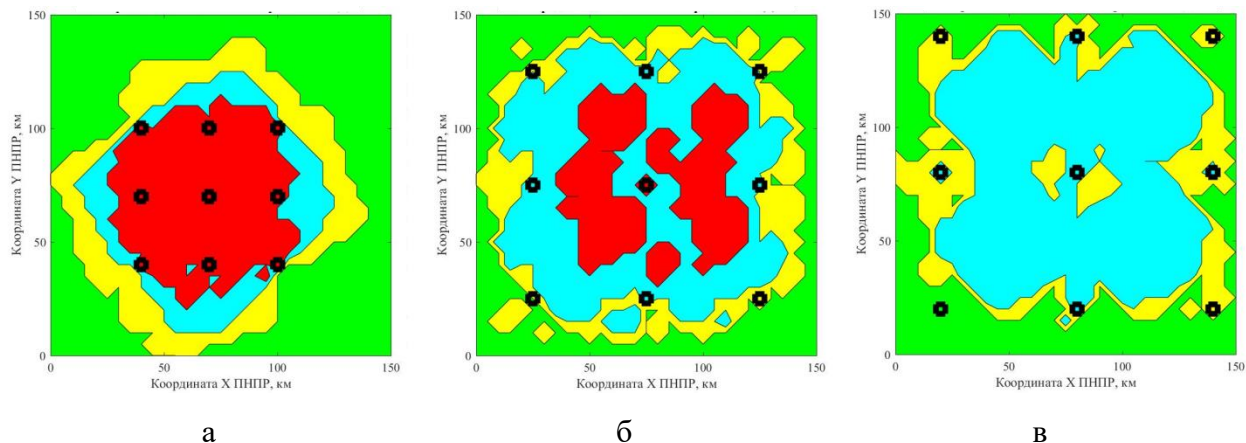


Рисунок 4.3 - Зоны РП НАП с ААР4 на высоте 200 м при воздействии ЗШП: расстояние между ПРП: а - 30 км, б - 50 км, в - 60 км

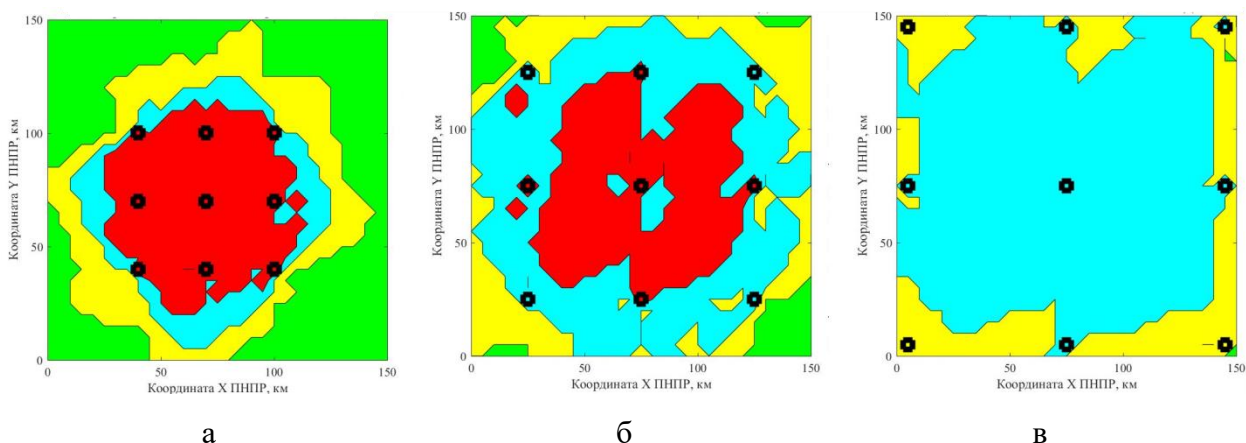


Рисунок 4.4 - Зоны РП НАП с ААР4 на высоте 1000 м при воздействии ЗШП: расстояние между ПРП: а - 30 км, б - 60 км, в - 70 км

Для радиоподавления НАП с ААР4 на высоте 200 м и 1000 м в режиме слежения за фазой НС в пределах всего кластера из девяти ПРП достаточно иметь расстояние между ПРП не более 30 км. Для реализации предотвращения поиска/доиска НС после срыва слежения расстояние между ПРП можно увеличить до двух раз (50...60 км). На высоте 1000 м расстояние между ПРП в глубине защищаемой территории при подавлении НАП с ААР4 можно увеличить до 70 км, что обусловлено увеличением количества МРП одновременно воздействующих на НАП внутри кластера за счет увеличения дальности прямой видимости ПРП.

В частности, результаты модельного эксперимента по оценке зон радиоподавления типового образца ААР4, размещенной на малоразмерном беспилотном летательном аппарате, при воздействии специализированных модулей радиопомех совпадают с результатами натурных полигонных экспериментов, проводимых АО «НТЦ РЭБ» во время испытаний демонстрационного образца комплекса РЭБ с малоразмерными БЛА «Репеллент».

На рисунках 4.5 и 4.6 приведены конфигурация ПНПР, состоящая из двух кластеров ПРП, и сечения зоны РП НАП с ААР4 на высоте 200 м и 1000 м.

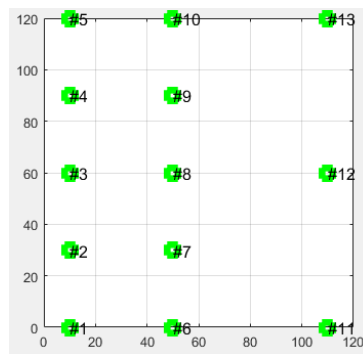


Рисунок 4.5 - Конфигурация ПНПР с барьерной зоной для радиоподавления НАП с ААР4

Первый кластер ПРП (№1-10) создает барьерную зону, в которой обеспечивается срыв слежения за фазой НС. ПРП с номерами №1-5 содержат всего по одному МРП направленному на восток. ПРП с номерами №6-10 содержат по три МРП (стандартная расстановка). ПРП с номерами №11-13 также содержат по три МРП и они представляют первый ряд из состава второго кластера (см. рисунок 4.3 (в)), который реализует защиту сегмента территории и обеспечивает предотвращение допоиска НС.

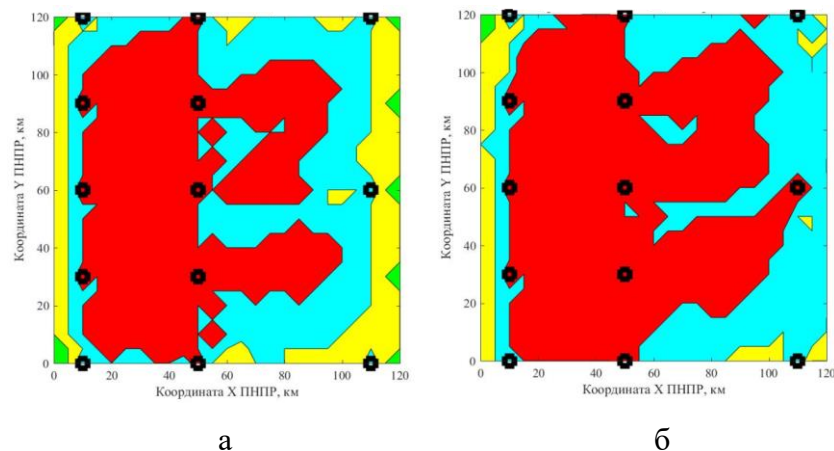


Рисунок 4.6 - Зоны РП НАП с ААР4 на высоте 200 м (а) и 1000 м (б) в барьерной зоне при воздействии ЗШП

Из рисунка 4.6 видно, что в барьерной зоне, созданной ПРП с номерами №1-10, реализуется срыв слежения за фазой НС, а промежуточной зоне между ПРП №6-10 гарантированно реализуется срыв допоиска НС, что позволяет использовать в дальнейшем расстановку ПРП с шагом 50...60 км.

Представляет также интерес проанализировать зоны радиоподавления НАП, работающей с разными сигналами, при воздействии различных помех, например, для конфигурации ПНПР из девяти ПРП с шагом 40 км.

На рисунках 4.7, 4.8 приведены сечения зоны РП НАП с ААР4 на высотах 200 и 1000 м для различных типов АП и принимаемых сигналов (С/А и одновременно всех НС).

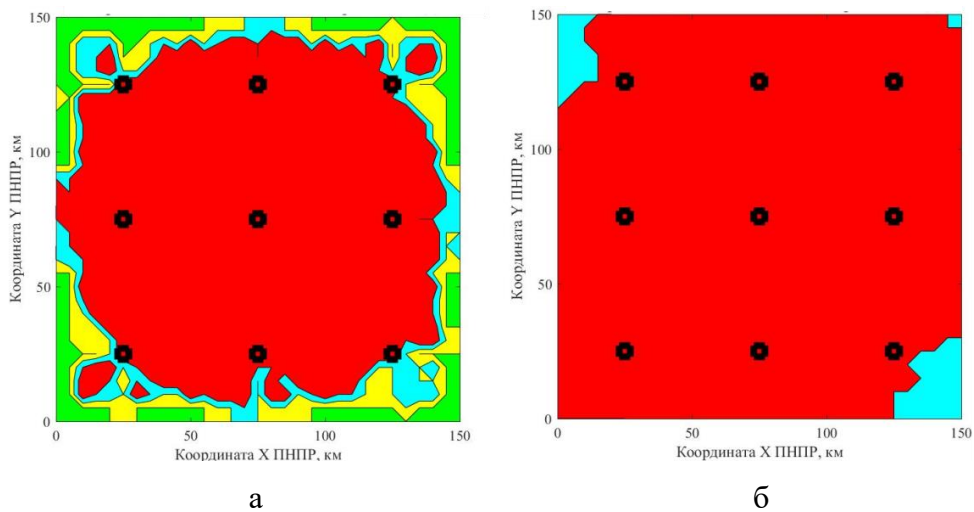


Рисунок 4.7 - Зоны РП НАП, работающей по С/А-коду, с ААР4 на высоте 200 м (а) и 1000 м (б) при воздействии помехи с модуляцией ВРСК(1).

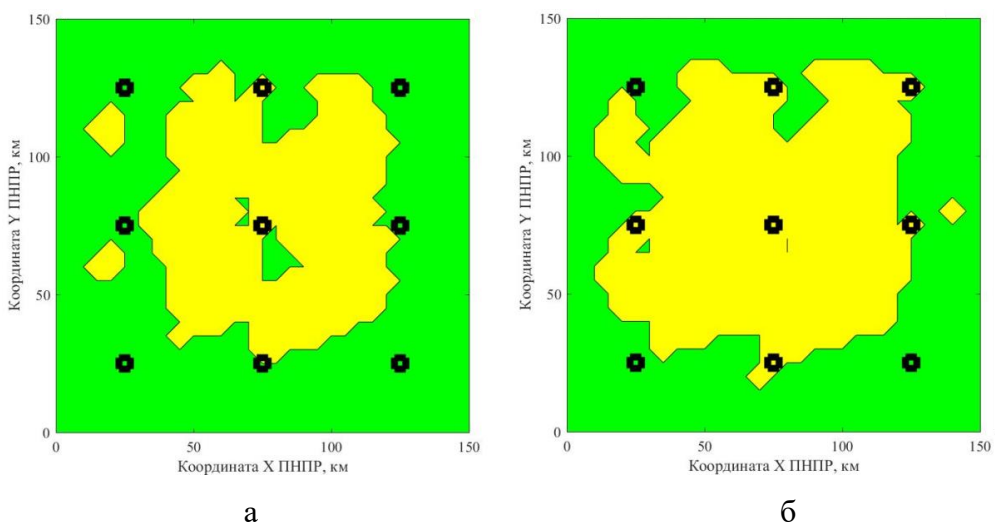


Рисунок 4.8 - Зоны РП НАП с ААР4 на высоте 200 м (а) и 1000 м (б) при воздействии сигналоподобной помехи с модуляцией ВРСК(1)

Анализируя зоны РП на рисунке 4.7 видно, что при решении задачи радиоподавления гражданской НАП СРНС, работающей по открытым сигналам С/А и оснащенной ААР4, сигналоподобная помеха с модуляцией BPSK(1) является достаточно эффективной. С другой стороны, при решении задач радиоподавления военных приемников, работающих по сигналам Р(У) и М (и других) она является неэффективной. В частности, на рисунке 4.8 показана зона РП одновременно нескольких сигналов GPS. Данная зона РП определяется наиболее помехозащищенным сигналом (М-кодом), для которого помеха с модуляцией BPSK(1) наименее эффективна (см. таблицу 2.11) из-за частотного разноса спектров подавляемого сигнала и помехи.

На рисунках 4.9, 4.10 показаны зоны РП одновременно нескольких сигналов GPS при воздействии на НАП с ААР4 активных помех вида ЗШП и ССП. Применение ССП при подавлении одновременно всех сигналов НС GPS немного эффективнее, чем ЗШП с равномерной СПМ, что обусловлено оптимизацией суммарного помехового спектра по сравнению с ЗШП.

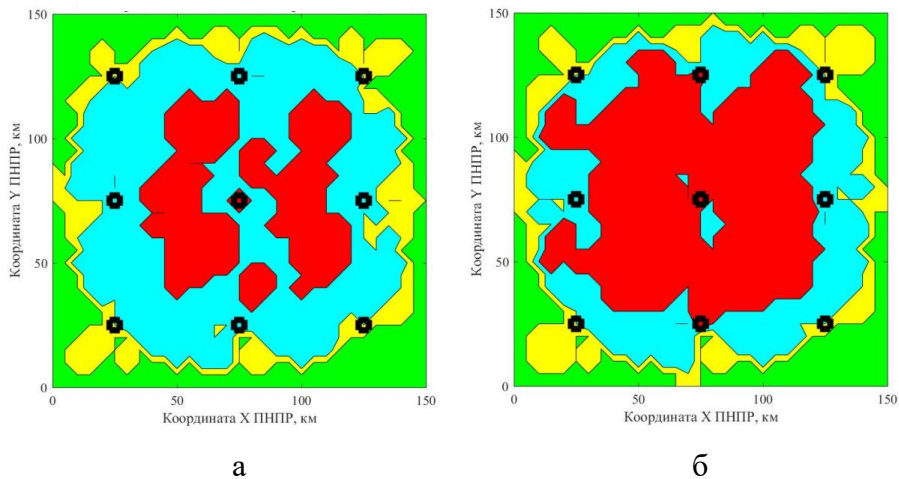


Рисунок 4.9 - Зоны РП НАП с ААР4 на высоте 200 м при воздействии ЗШП (а) и ССП (б)

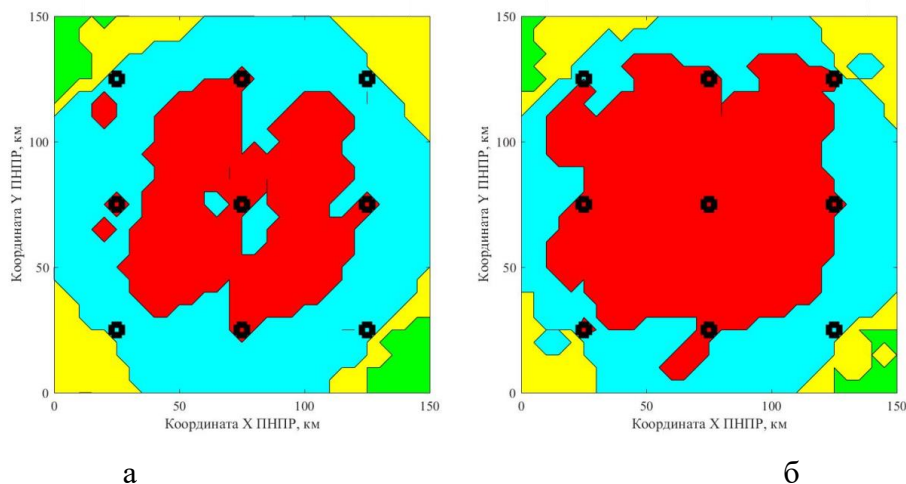


Рисунок 4.10 - Зоны РП НАП с ААР4 на высоте 1000 м при воздействии ЗШП (а) и ССП (б)

В целом, ПНПР с расстановкой вида «квадрат» достаточно эффективно обеспечивает радиоподавления НАП с ААР4, поскольку практически в каждой точке ПНПР выполняются условия «перегрузки» ААР4:

- на ААР4 воздействуют одновременно не менее четырех ПРП;
- расстановка ПРП относительно платформы ААР4 удовлетворяет требованиям по взаимному азимутальному разнесу между соседними ПРП - более  $20^\circ$  (для четырех ПРП).

Также стоит отметить факт ослабления «низколетящих» сопровождаемых НСЗ за счет небольшого углового разнеса между НСЗ и ПРП. Например, при расчете зон РП НАП с ААР4 (рисунок 4.6) коэффициенты передачи НС в направлении НСЗ составили (в среднем):

для НСЗ №1 с углом места  $60^\circ$ : минимальный около 0,5 дБ, максимальный до 5,2 дБ;

для НСЗ №2-8 с углами места от  $10^\circ$  до  $30^\circ$ : минимальный до минус 21 дБ, максимальный до 2.8 дБ.

Организация ПНПР с применением барьерной зоны позволяет существенно увеличить шаг расстановки ПРП (до двух раз для высоты полета НАП 200 м) в глубине защищаемой территории (непосредственно вокруг объекта защиты).

#### 4.2.3 Оценка зон радиоподавления навигационной аппаратуры потребителей с семи-элементной адаптивной антенной решеткой для конфигурации противонавигационного поля радиопомех с расстановкой вида «квадрат»

В качестве примера рассмотрим конфигурация ПНПР с расстановкой вида «квадрат» (16 ПРП). На рисунках 4.11, 4.12 приведены сечения зон РП НАП с ААР7 на высотах 200 м и 1000 м при воздействии ЗШП с расстоянием между ПРП – 20, 30, 40 и 50 км.

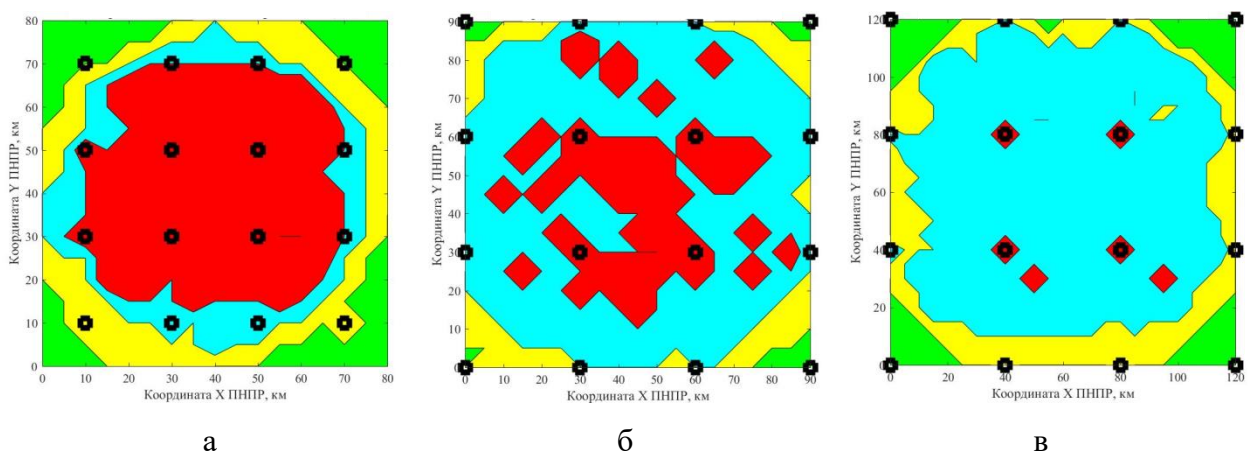


Рисунок 4.11 - Зоны РП НАП с ААР7 на высоте 200 м при воздействии ЗШП, расстояние между ПРП: а - 20 км, б - 30 км, в - 40 км

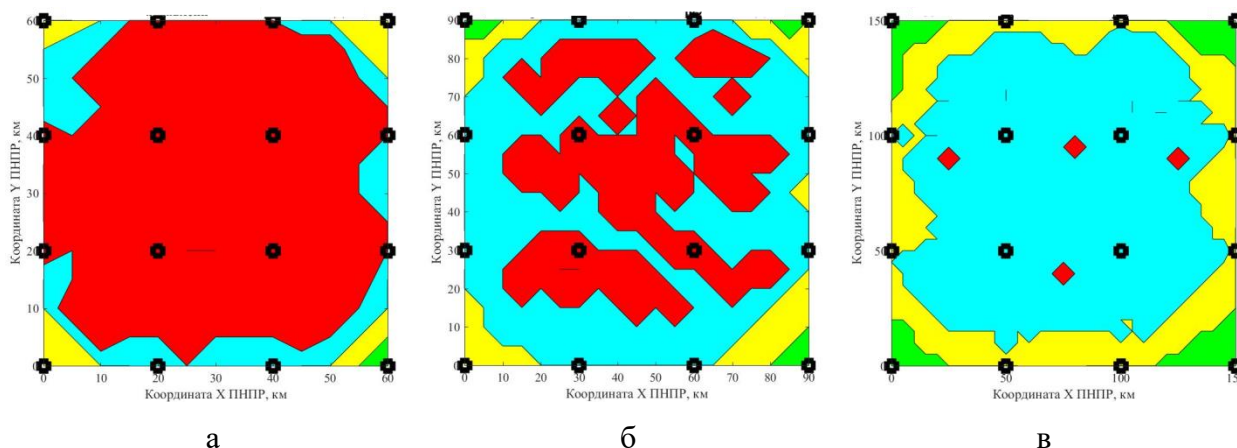


Рисунок 4.12 - Зоны РП НАП с ААР7 на высоте 1000 м при воздействии ЗШП, расстояние между ПРП: а - 20 км, б - 30 км, в - 50 км

Для радиоподавления НАП с ААР7 на высоте 200 м и 1000 м в режиме слежения за фазой НС в пределах всего кластера из 16 ПРП необходимо иметь расстояние между ПРП не более 20 км. Для реализации предотвращения поиска/допоиска НС после срыва слежения расстояние между ПРП можно увеличить до двух раз (30...40 км), таким образом существенно уменьшая затраты на создание ПНПР в глубине защищаемой территории. На высоте 1000 м расстояние между ПРП в глубине защищаемой территории при подавлении НАП с ААР7 можно увеличить до 50 км, что обусловлено увеличением количества МРП одновременно воздействующих на НАП внутри кластера за счет увеличения дальности прямой видимости относительно ПРП.

На рисунках 4.13, 4.14 приведены конфигурация ПНПР, состоящая из двух кластеров, и сечения зоны РП НАП с ААР7 на высоте 200 м и 1000 м.

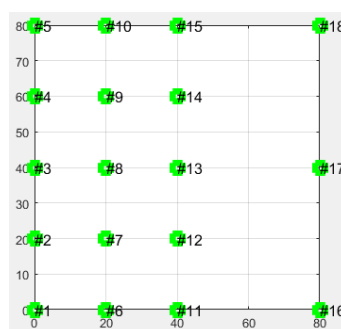


Рисунок 4.13 - Конфигурация ПНПР с барьерной зоной для радиоподавления ААР7

ПРП с №1-15 создают барьерную зону, в которой обеспечивается срыв слежения за фазой НС. ПРП с №1-5 содержат всего по одному МРП, направленному на восток. ПРП с №6-15 содержат по три МРП (стандартная расстановка). ПРП с номерами №16-18 также содержат по три

МРП, и они представляют первый ряд из состава второго кластера, который реализует защиту сегмента территории и обеспечивает предотвращение допоиска НС, после прохождения НАП с ААР7 барьерной зоны.

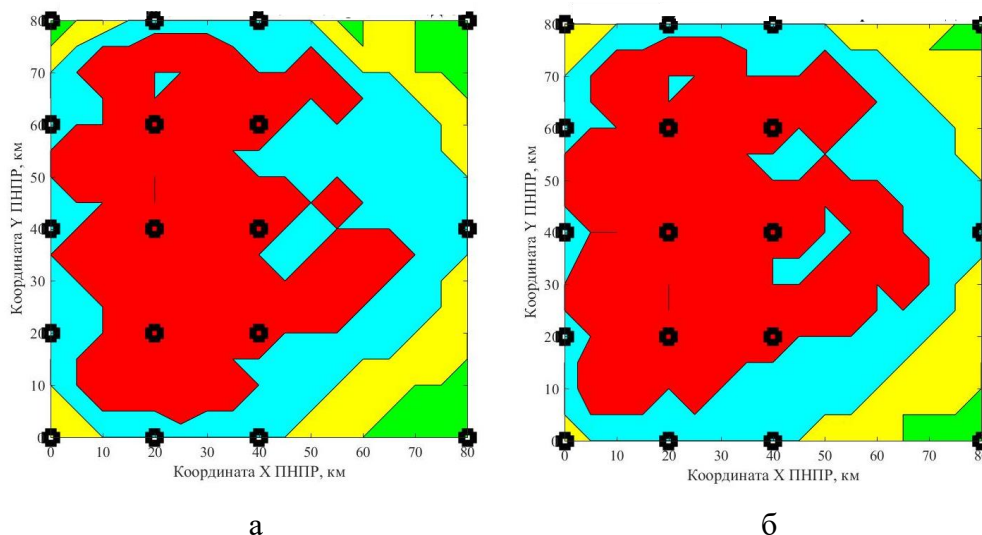


Рисунок 4.14 - Зоны РП НАП с ААР7 на высоте 200 м (а) и 1000 м (б) в барьерной зоне при воздействии ЗШП

Из рисунка 4.14 видно, что в барьерной зоне, созданной ПРП с номерами №1-15, реализуется срыв слежения за фазой НС, а промежуточной зоне между ПРП №11-18 гарантированно реализуется срыв допоиска НС, что позволяет использовать в дальнейшем расстановку ПРП с шагом 30...40 км. В периметре, ограниченном ПРП №6-15, на НАП с ААР7 одновременно воздействуют не менее девяти ПРП, что позволяет снизить коэффициент улучшения ААР7 за счет формирования «кольцевого» провала до 40 дБ для НС, находящегося в зените.

За счет формирования «кольцевого» провала, значительно ослабляются коэффициенты передачи НС в направлении «низколетящих» НСЗ, значения которых для зон РП, показанных на рисунке 4.14, составляют (в среднем):

для НСЗ №1 с углом места  $60^\circ$ : минимальный около 0,3 дБ, максимальный до 7,6 дБ;

для НС №2-8 с углами места от  $10^\circ$  до  $30^\circ$ : минимальный до минус 25 дБ, максимальный до 4 дБ.

Требования, предъявляемые к плотности расстановки ПРП в пределах ПНПР для радиоподавления НАП с ААР7, значительно более жесткие, чем для радиоподавления НАП с ААР4. Применение барьерной зоны позволяет, аналогично случаю с ААР4, уменьшить плотность расстановки ПРП при радиоподавлении НАП с ААР7 в глубине защищаемой территории до двух раз (с 20 км до 40 км).

### 4.3 Выводы по разделу 4

1. Создание ПНПР для организации объектово-территориальной защиты при наличии у подавляемой НАП средств ПЗ на базе ААР (ААР4 и ААР7) требует значительных энергетических и технических затрат.

2. Разработанная КИМ сценария радиоподавления НАП СРНС позволяет оценить эффективность конфигурации ПРС РЭБ, выявить ее недостатки (наличие разрывов в формируемом ПНПР) при решении конкретных задач радиоподавления помехозащищённой НАП с ААР на различных высотах в интересах объектово-территориальной защиты. Кроме того, КИМ сценария радиоподавления НАП СРНС может быть использована для обоснования программы натурных полигонных испытаний изделий «Поле-21Э» [58], «Оптима-3.2» [59] и др., что позволит сэкономить ресурсы на проведение летных испытаний.

3. Конфигурация ПНПР вида «квадрат» позволяет эффективно противодействовать помехозащищенной НАП СРНС, оснащенной ААР4 или ААР7. Шаг расстановки ПРП внутри одного кластера ПНПР для противодействия ААР4 должен быть не более 30 км, а для ААР7 не более 20 км (для заданных характеристик МРП, условий и критериев подавления, а также высоты полета носителя НАП). Важно отметить, что НАП может работать одновременно на нескольких частотах, что потребует кратного увеличения общего количества МРП в составе ПРП.

4. При организации объектово-территориальной защиты предлагается использовать конфигурацию ПНПР вида «квадрат» с барьерной зоной, которая позволит увеличить взаимное расстояние между ПРП за пределами барьерной зоны в глубине защищаемой территории за счет учета особенностей функционирования НАП в различных режимах. Например, для высоты полета НАП 200 м и 1000 м шаг расстановки ПРП в глубине защищаемой территории может быть увеличен до двух раз – с 30 км до 50...60 км и с 20 км до 30...40 км для ААР4 и ААР7 соответственно.



## 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 конфигураций ПРС РЭБ, в том числе на базе изделий «Поле-21Э», «Оптима-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 антенной решетки
ВА ОСП	–	Выигрыш за счет адаптации антенной решетки относительно неадаптивной 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.
7. Перов А.И. Синтез оптимального алгоритма обработки сигналов в приемниках спутниковой навигации при воздействии гармонической помехи. М.: Радиотехника. Радиосистемы, №7, 2005, с. 36-42.
8. Соколов Иван Михайлович. Метод многоканальной цифровой фильтрации помех для аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем: диссертация ... кандидата технических наук: 05.12.14 / Москва, 2015, 128 с.
9. Перов А.И., Болденков Е.Н. Исследование адаптивных трансверсальных фильтров приемников спутниковой навигации при воздействии узкополосных помех / Радиотехника №7, 2006, с. 98-105.
10. Akos, D. M. *Who's Afraid of the Spoofer? GPS/GNSS Spoofing Detection via Automatic Gain Control (AGC)* in Journal of Navigation, vol. 59, no. 4, Winter, Institute of Navigation, 2012, pp. 281-290.
11. Dehghanian, V., J. Nielsen, G. Lachapelle *GNSS Spoofing Detection Based on Receiver C/No Estimates* in Proceedings of the 25th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012), September 17-21, Nashville, TN, 2012, pp. 2878-2884.
12. Ali Jafarnia-Jahromi, Ali Broumandan, John Nielsen, Gerard Lachapelle *GPS Vulnerability to Spoofing Threats and a Review of Antispoofing Techniques* in International Journal of Navigation and Observation, Article ID 127072, 2012, 16 pages.

13. Wen, H., P. Y. Huang, J. Dyer, A. Archinal, J. Fagan *Countermeasures for GPS Signal Spoofing* in Proceedings of ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division, September 13 - 16, Long Beach, CA, 2005, pp. 1285- 1295.
14. Zhang, Z., M.Trinkle, L. Qian, H. Li *Quickest detection of GPS spoofing attack* in 2012 IEEE Military Communications Conference, Oct 29- Nov 1, Orlando, FL, 2012, pp. 1-6.
15. Nielsen, J., G. Lachapelle, A. Broumandan *Method and System for Detecting GNSS Spoofing Signals* U.S. Patent No. 7,952,519 B1, 2010.
16. Montgomery, P.Y., T.E. Humphreys, B.M. Ledvina *Receiver-Autonomous Spoofing Detection: Experimental Results of a Multi-antenna Receiver Defense Against a Portable Civil GPS Spoofer* in Proceedings of ION ITM 2009, Jan 26-28, Anaheim, CA, 2009, pp. 124-130.
17. Daneshmand, S., A. Jafarnia-Jahromi, A. Broumandan G. Lachapelle *A Low-Complexity GPS Anti-Spoofing Method Using a Multi-Antenna Array* in Proceedings of the 25th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012), 17-21 September, Nashville TN, 2012, 11 pages.
18. Nielsen, J., A. Broumandan, G. Lachapelle *GNSS Spoofing Detection for Single Antenna Handheld Receivers* in Journal of Navigation, vol 58, no 4, Winter, 2011, pp. 335-344.
19. Swaszek, P. F., R. J. Hartnett, M. V. Kempe, G. W. Johnson *Analysis of a Simple, Multi-Receiver GPS Spoof Detector* in Proceedings of the 2013 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, Jan. 29 – 27, San Diego, CA, 2013, pp. 884-892.
20. Mark L. Psiaki, Brady W. O’Hanlon *Civilian GPS Spoofing Detection based on Dual-Receiver Correlation of Military Signals* Preprint from ION GNSS 2011, Cornell University, Ithaca, N.Y. 14853-7501, U.S.A., 2011, pp. 1 – 27.
21. Humphreys, T. E., B. M. Ledvina, M. L. Psiaki, B. W. O’Hanlon, P. M. Kintner *Assessing the Spoofing Threat: Development of a Portable GPS Civilian Spoofer* in Proceedings of ION GNSS 21st. International Technical Meeting of the Satellite Division, September 16-19, Savannah, GA, 2008, pp. 2314-2325.
22. Jafarnia, A. *GNSS Signal Authenticity Verification in the Presence of Structural Interference*, PhD Thesis, Report No. 20385, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, 2013, 202 p.
23. Jafarnia-Jahromi, A., T. Lin, A. Broumandan, J. Nielsen, G. Lachapelle *Detection and Mitigation of Spoofing Attacks on a Vector Based Tracking GPS Receiver* Proceedings of International Technical Meeting of the Institute of Navigation (ION ITM 2012), 30 January-1 February, Newport Beach, CA, 2012b, pp. 790-800.
24. Humphreys, T. E., B. M. Ledvina, M. L. Psiaki, B. W. O’Hanlon, P. M. Kintner *Assessing the Spoofing Threat: Development of a Portable GPS Civilian Spoofer* in Proceedings of ION GNSS 21st. International Technical Meeting of the Satellite Division, September 16-19, Savannah, GA, 2008, pp. 2314-

2325.

25. B. M. Ledvina, W. J. Bencze, B. Galusha, I. Miller *An in-line anti-spoofing device for legacy civil GPS receivers* in Proceedings of the Institute of Navigation—International Technical Meeting, San Diego, Calif, USA, January 2010, pp. 698–712.

26. Carles Fern´andez–Prades, Javier Arribas, Pau Closas *Robust GNSS receivers by array signal processing: Theory and implementation*. Proceedings of the IEEE March 2016. DOI: 10.1109/JPROC.2016.2532963.

27. H. Van Trees *Optimum Array Processing*, New York: Wiley-Interscience, 2002.

28. Харисов В.Н., Быстраков С.Г., Пастухов А.В., Сизов Р.Н. Метод задания требований к неидентичности каналов компенсаторов помех / Радиотехника, №7, 2007 г., с. 113-120.

29. Ефименко В.С., Пастухов А.В., Ворончихин Д.Н. Новые методы реализации алгоритмов пространственно-временной обработки / Радиотехника, №9, 2014 г.

30. Малогабаритная адаптивная антенная решетка (МААР) четырехэлементная серии «Комета». URL: <http://www.vniir-progress.ru/production/malogabaritnye-adaptivnye-antennye-reshetki-chetyrexele-mentnye-serii-kometa/> [Электронный ресурс] доступ: свободный (дата обращения 15.03.2018 г.).

31. Interface Specification IS-GPS-200 (Updated Jul 2017) (URL: <https://www.gps.gov/technical/icwg/>), [Электронный ресурс], доступ: свободный (дата обращения 30.11.2017).

32. D.E. Kaplan, C.J. Hegarty *Understanding GPS. Principles and Applications. Second Edition*, ARTECH HOUSE, INC., 2006. – 723 pp.

33. *Overview of the GPS M Code Signal* (URL: [https://www.mitre.org/sites/default/files/pdf/betz\\_overview.pdf](https://www.mitre.org/sites/default/files/pdf/betz_overview.pdf)) [Электронный ресурс], доступ: свободный (дата обращения 30.11.2017).

34. Interface Specification IS-GPS-800 (Updated Jul 2017) (URL: <https://www.gps.gov/technical/icwg/>), [Электронный ресурс], доступ: свободный (дата обращения 30.11.2017).

35. 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.

36. М.И. Драгалин. Прогнозирование критических ситуаций при функционировании аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем в условиях действия преднамеренных помех: диссертация кандидата технических наук: 05.12.14. – Москва, 2003. – 191 с.: ил. РГБ ОД, 61 03-5/3133-6.

37. Дятлов А. П., Дятлов П. А., Кульбикаян Б. Х. Радиоэлектронная борьба со спутниковыми радионавигационными системами. Монография. — М.: Радио и связь, 2004. — 226 с.

38. Юдин В.Н., Носов Н.В. Помехоустойчивость спутниковой радионавигационной системы по

- отношению к помехам внутрисистемного типа / Вестник Московского авиационного института, т.17, №6, 2010, с.120-124.
39. Перов А.И., Болденков Е.Н., Бакитько Р.В. Анализ влияния внутрисистемных помех на аппаратуру потребителей спутниковых радионавигационных систем / М.: Радиотехника, №1, 2009, с. 20-28.
40. URL: <http://www.spirent.com> [Электронный ресурс], доступ: свободный (дата обращения 31.05.2015 г.).
41. Добыкин В.Д., Куприянов А.И., Пономарев В.Г., Шустов Л.Н. Радиоэлектронная борьба. Цифровое запоминание и воспроизведение радиосигналов и электромагнитных волн / М.: Вузовская книга, 2009 г., 360 с.
42. Перунов Ю.М., Фомичев К.И., Юдин Л.М. Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием / М.: Радиотехника, 2003. — 416 с.: ил. — ISBN: 5-93108-039-2.
43. URL <http://nvs-gnss.ru/products/test-equipment/item/57-gps-glonass-repiter.html> [Электронный ресурс], доступ: свободный (дата обращения 31.05.2015 г.).
44. Поваляев Е., Хуторной С. Системы спутниковой навигации ГЛОНАСС и GPS. Часть 3. Борьба с многолучевостью / Инженерная электроника. 2002. №2, с. 23-30.
45. Аналого-цифровое преобразование, под. ред. Уолта Кестера: Пер. с англ. / М.: Техносфера, 2007. - 1016: ил.
46. Бакитько Р.В., Польщиков В.П., Шилов А.И., Хацкелевич Я.Д., Болденков Е.Н. Использование весовых функций для предварительной обработки шумоподобных сигналов при наличии сильных интерференционных помех / Радиотехника, №6, 2006, с 13-17.
47. Функциональное дополнение к ГНСС ГЛОНАСС на основе псевдоспутников для обеспечения точной посадки воздушных судов и решения специальных задач. URL: <http://www.vedapro.ru/files/GPS2.pps> [Электронный ресурс], доступ: свободный (дата обращения 31.05.2015 г.).
48. Юдин В.Н., Камнев Е.А. Принципы создания противонавигационного поля радиопомех / Труды МАИ, выпуск №83, 2015.
49. 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.
50. 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.
51. Юдин В.Н., Камнев Е.А. Условие радиоподавления НАП спутниковых РНС с учетом внутрисистемных факторов / Электросвязь, выпуск №10, 2017, с. 46-50.

52. Юдин В.Н., Камнев Е.А. Условие радиоподавления НАП спутниковых РНС с учетом наличия средств помехозащиты / Электросвязь, выпуск №10, 2017, с. 51-58.
53. Сосулин Ю.Г. Теория обнаружения и оценивания стохастических сигналов. – М.: Сов. радио, 1978. – 420 с.
54. Свешников А.А. Сборник задач по теории вероятностей, математической статистике и теории случайных функций. – СПб.: Лань, 2008. – 446 с.
55. Ефименко В.С, Харисов В.Н, Быстраков С.Г., Конаныкин Е.С. Исследование характеристик поляризационного антенного компенсатора помех для приемников СРНС / Радиотехника, №7, 2007.
56. 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.
57. Юдин В.Н., Камнев Е.А. Помехоустойчивость навигационной аппаратуры потребителя спутниковых радионавигационных систем с четырехэлементной антенной решеткой / Электросвязь, выпуск №6, 2018, с. 24-31.
58. Унифицированные модули радиопомех пространственно-распределенной системы прикрытия объектов от прицельного применения высокоточного оружия «Поле-21Э». URL: <http://www.ntc-reb.ru/pole.html>. [Электронный ресурс] доступ: свободный (дата обращения 15.03.2018 г.).
59. Комплекс помех навигационной аппаратуре потребителей систем GPS и ГЛОНАСС «Оптимал-3.2». URL: <http://www.kbradar.by/products/radioelektronnaya-borba/peredatchiki-i-kompleksy-pomekh-navigatsionnoy-apparaturoy-potrebiteley-sistem-gps-i-glonass/115/>. [Электронный ресурс] доступ: свободный (дата обращения 15.03.2018 г.).