

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

На правах рукописи



**Волков Антон Михайлович**

**РАДИОПОДАВЛЕНИЕ СРЕДСТВ РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ  
В ИНТЕРЕСАХ ЗАЩИТЫ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СРЕДСТВ**

2.2.16. РАДИОЛОКАЦИЯ И РАДИОНАВИГАЦИЯ

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук  
Юдин Василий Николаевич

Москва – 2023

## Оглавление

Введение .....	5
1 Обоснование актуальности противодействия средствам РТР .....	13
1.1 Общие сведения о современных средствах РТР .....	13
1.2 Обзор традиционных методов защиты РЛС от средств РТР .....	15
1.3 Достижимые уровни ошибок местоопределения РЛС угломерным методом.....	18
1.3.1 Общие сведения о многопозиционной угломерной системе воздушной разведки на базе одиночного авиационного носителя..	18
1.3.2 Постановка задачи локации источников излучения при работе угломерной системы.....	20
1.3.3 Описание модели.....	29
1.3.4 Результаты модельного эксперимента .....	29
1.3.5 Обсуждение результатов модельного эксперимента.....	36
1.4 Выводы по разделу 1 .....	39
2 Определение содержания и возможностей защиты РЛС от средств РТР методами радиоподавления .....	40
2.1 Сущность и классификация радиоподавления средств РТР в интересах защиты РЛС .....	40
2.2 Активная маскировка излучения защищаемого РЛС .....	45
2.2.1 Требования к активной маскирующей радиопомехе и критерии подавления средства РТР .....	46
2.2.2 Мощность САП шумового прикрытия РЛС, требуемая для подавления средства РТР .....	53
2.2.3 Зональные показатели эффективности радиоподавления средства РТР методом шумовой маскировки излучения защищаемого РЛС .....	58

2.2.4 Электромагнитная совместимость защищаемого РЛС и САП шумовой маскировки излучения РЛС .....	75
2.3 Имитация и искажение излучения защищаемого РЛС.....	76
2.3.1 Сущность имитации и искажения излучения РЛС .....	77
2.3.2 Возможные варианты применения помех имитирующего и искажающего действия в интересах защиты РЛС .....	79
2.4 Выводы по разделу 2 .....	98
3 Технически реализуемые предложения по организации радиоподавления средств РТР в интересах защиты РЛС .....	105
3.1 Трудности, возникающие при организации активного радиоподавления РЛС и возможные пути их преодоления .....	105
3.2 Шумовая маскировка излучения РЛС на базе САП, встроенного в антенно-передающий тракт РЛС.....	118
3.2.1 Сущность и параметры предлагаемого способа защиты РЛС.....	118
3.2.2 Оценка влияния шума, маскирующего излучение РЛС, на дальность радиолокации .....	124
3.2.3 Характеристика способа шумового прикрытия РЛС, основанного на использовании САП, встроенного в РЛС.....	126
3.3 Шумовая маскировка бокового излучения РЛС с помощью САП, размещаемого на позиции РЛС .....	128
3.3.1 Сущность и параметры предлагаемого способа защиты РЛС.....	128
3.3.2 Требуемая мощность САП шумовой маскировки бокового излучения РЛС, размещаемого на позиции защищаемого РЛС ....	132
3.3.3 Зоны маскировки излучения РЛС, обеспечиваемые при размещении САП шумового прикрытия на позиции защищаемого РЛС.....	133

3.3.4 Оценка влияния шума, маскирующего импульсы излучения РЛС, на дальность радиолокации .....	133
3.4. Шумовая маскировка бокового излучения РЛС от орбитальных средств РТР.....	137
3.4.1. Сущность и параметры предлагаемого способа защиты РЛС.....	137
3.5 Имитационно-шумовое прикрытие РЛС.....	139
3.6. Выводы по разделу 3 .....	141
4 Оценка эффективности разработанных предложений по организации радиоподавления средств РТР в интересах защиты РЛС .....	144
4.1 Расчетно-имитационная модель для оценки эффективности радиоподавления СРТР в интересах защиты РЛС.....	144
4.2 Модельный эксперимент по определению эффективности шумовой маскировки излучения РЛС в целях защиты от средств РТР .....	146
4.2.1 Описание модельного эксперимента .....	146
4.2.2 Общие параметры модельного эксперимента.....	149
4.2.3 Шумовая маскировка с помощью САП, встроенного в антенно-передающий тракт РЛС .....	151
4.2.4 Шумовая маскировка бокового излучения РЛС с помощью САП, размещаемых на позиции РЛС .....	156
4.2.5 Шумовая маскировка бокового излучения РЛС от орбитальных средств РТР .....	164
4.3 Выводы по разделу 4.....	167
Заключение .....	169
Список сокращений и условных обозначений .....	170
Список литературы .....	171
Приложение А. Копия акта внедрения .....	181

## Введение

**Актуальность темы исследования** обусловлена высоким уровнем развития современной техники радиотехнической разведки (РТР) и необходимостью защиты радиолокационных средств (РЛС) различного назначения от средств РТР. Техническое совершенство и широкое распространение средств РТР привело в настоящее время к возникновению серьезных проблем для РЛС различного назначения. Информация, получаемая от средств РТР, может быть использована противной стороной при организации противодействия функционированию РЛС средствами радиоэлектронной борьбы (РЭБ), в том числе, средствами радиоэлектронного и/или огневого поражения.

К традиционным мерам защиты от средств РТР, применяемым при разработке и эксплуатации современных РЛС, относятся уменьшение мощности зондирующего излучения, снижение уровней боковых лепестков диаграммы направленности (ДН) антенны, перестройка несущей частоты и частоты повторения импульсов, а также использование "трудноразведуемых" (широкополосных, шумоподобных) зондирующих сигналов [5, 6, 24, 29-31, 33, 46, 47, 55, 56, 61, 66, 69]. Кроме перечисленных выше, могут быть применены многопозиционное построение [45], пассивные режимы работы активных РЛС, а также меры организационного характера, такие, как сокращение времени излучения [7, 45, 51] и быстрая смена позиций РЛС [22].

Однако перечисленные меры оказываются эффективными не всегда и не в достаточной степени. Сказанное объясняется, прежде всего, высоким уровнем развития современной техники РТР. Достижимые уровни чувствительности приемных трактов средств РТР обычно достаточны для обнаружения сигналов, излучаемых в направлениях главных и ближних боковых лепестков ДН антенны РЛС, а также, во многих случаях, в направлениях дальних боковых лепестков. Как правило, в современных

средствах РТР реализуется мгновенный обзор рабочих угловых секторов (за счет использования слабонаправленных и многолучевых антенн) и рабочих диапазонов частот (за счет использования широкополосных и многоканальных по частоте приемных устройств). Высоких уровней развития достигли также методы и средства измерения параметров, распознавания и сортировки обнаруживаемых сигналов, местоопределения, идентификации разведываемых радиоэлектронных средств (РЭС) и определения их носителей [3, 31, 44, 45, 54, 63, 79].

Другая причина недостаточной эффективности традиционных мер защиты РЛС от средств РТР заключается в том, что они не всегда реализуемы. Например, оказывается проблематичным энергетическое скрывание РЛС, работающих в составе наземных средств противовоздушной обороны (ПВО): РЛС обнаружения воздушных целей (ВЦ), РЛС наведения управляемых ракет, многофункциональных РЛС зенитных ракетных комплексов и других. Эти РЛС являются, как правило, высокопотенциальными (импульсная мощность излучения составляет десятки и сотни киловатт), что диктуется необходимостью обнаружения и сопровождения малозаметных ВЦ на больших дальностях десятки и сотни километров [35, 55, 56]. Скывание параметров излучения РЛС путем их перестройки по труднопредсказуемым законам также не всегда позволяет достичь желаемого результата. Допустимая полоса перестройки несущей частоты РЛС обычно не превышает нескольких процентов от центральной частоты рабочей полосы. Кроме того, по данным некоторых исследований применение широкополосных фазокодированных (ФКМ) и линейно-частотно-модулированных (ЛЧМ) сигналов не всегда обеспечивает достаточные уровни скывности РЛС [16, 37, 80]. Применение шумоподобных сигналов не позволяет обнаруживать цели на приемлемых для решения задач ПВО дальностях [69]. Существуют и другие причины, затрудняющие решение задач снижения разведываемости РЛС (скывания РЭС от средств РТР).

Указанные обстоятельства приводят к тому, что современные средства РТР могут, как правило, успешно решать задачи обнаружения, определения параметров излучения, идентификации и местоопределения высокопотенциальных РЛС с направлений главного и боковых (как ближних, так и дальних) лепестков ДН их антенн [37, 55, 56].

В связи со сказанным, актуальны другие подходы к повышению защищенности РЛС от средств РТР (снижению разведваемости РЛС). Они могут быть основаны, в частности, на радиоподавлении средств РТР. Суть таких подходов заключается в создании радиопомех средствам РТР, ведущим разведку защищаемых РЛС.

### **Степень разработанности темы**

Проблеме разработки способов защиты РЭС от средств разведки уделяется внимание в работах Ю.К. Меньшакова, А.А. Хорева, Ю.Ф. Каторина, П.А. Кострыкина, А.И. Куприянова, Н.Ф. Николенко, В.Е. Дулевича, С.Г. Вороны, Ю.М. Перунова, В.В. Цветнова, С.В. Козлова, Н.Н. Литвинова, Г.И. Тузова, Л.Е. Варакина, В.И. Борисова и других авторов [6, 9, 16, 24, 27, 29, 30, 33, 37, 39, 46, 47, 51, 55, 56, 61, 66-68]. В этих работах проблема защиты РЭС от средств РТР освещена преимущественно с позиций традиционных подходов (уменьшение импульсной мощности излучения, снижение уровней боковых лепестков ДН антенны, многопозиционное построение РЛС, использование трудноразведуемых (скрытных) зондирующих сигналов и т. д.).

Анализ публикаций по обсуждаемой тематике на предмет разработок нетрадиционных подходов к повышению защищенности РЛС от средств РТР (снижению разведваемости РЛС) позволяет выделить работы Ю.К. Меньшакова, Н.Ф. Николенко [46, 47, 51]. В этих работах, в основном, упоминается возможность воздействия на средства РТР радиопомехами, однако отсутствуют количественный анализ и конкретные технически реализуемые предложения. Отдельно следует выделить работу

В.С. Набилкина [49], в которой предложено использовать поляризационно-модулированные помехи для подавления средств РТР в целях повышения скрытности РЛС.

В связи со сказанным выше, тематика исследований диссертации, направленных на выявление возможностей радиоподавления средств РТР в интересах защиты РЛС и трудностей, возникающих при реализации этих возможностей, а также разработку технически реализуемых предложений и оценку их эффективности характеризуется высокой степенью актуальности.

### **Объект и предмет исследования**

В диссертационной работе в качестве объекта исследования рассматривается защищенность РЛС от средств РТР. Предмет исследования – методы и способы защиты РЛС, основанные на радиоподавлении средств РТР.

**Целью работы** является повышение защищенности РЛС за счет разработки технически реализуемых предложений по радиоподавлению средств РТР.

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

1. Обоснование актуальности противодействия РТР средствами радиоподавления в интересах защиты РЛС.
2. Определение содержания и возможностей противодействия средствам РТР в интересах защиты РЛС методами радиоподавления.
3. Определение трудностей, возникающих при реализации радиоподавления средств РТР, и путей их преодоления.
4. Разработка технически реализуемых предложений по защите РЛС от средств РТР методами радиоподавления.
5. Разработка критериев и количественных показателей эффективности радиоподавления средств РТР в интересах защиты РЛС.
6. Анализ эффективности разработанных предложений по защите РЛС от средств РТР методом модельного эксперимента.

### **Научная новизна**

В рамках исследования получены следующие новые научные результаты:

1. Разработан методический аппарат анализа защищенности РЛС от средств РТР методами шумовой маскировки излучения РЛС, включающий:

– показатели количественной оценки эффективности радиоподавления средств РТР в интересах защиты РЛС;

– методики определения требуемой мощности САП шумового прикрытия, реализующих защиту РЛС от средств РТР применительно к различным сценариям прикрытия;

– методики оценки эффективности защиты РЛС от средств РТР, основанные на предложенных количественных показателях.

2. Предложен подход к обеспечению электромагнитной совместимости защищаемого РЛС и средств шумового прикрытия РЛС, размещаемых на платформе РЛС, на позиции РЛС, за пределами позиции РЛС, а также встроенных в антенно-передающий тракт РЛС, основанный на прицельной по времени маскировке излучения РЛС шумовыми импульсами «ответного» или «накрывающего» типа.

3. Предложен оригинальный способ защиты РЛС от средств РТР, предполагающий использование «отвлекающих передатчиков», традиционно решающих задачи защиты РЛС от противорадиолокационных ракет, в интересах шумовой маскировки бокового излучения РЛС.

4. Предложен оригинальный способ защиты РЛС от средств РТР, позволяющий реализовать маскировку как бокового, так и зондирующего излучения РЛС, основанный на использовании антенны, передающего устройства и энергетического ресурса защищаемого РЛС в интересах шумовой маскировки излучения РЛС.

5. Предложен оригинальный способ защиты РЛС от средств РТР, основанный на совместном использовании средств шумовой маскировки излучения РЛС, встроенных в антенно-передающий тракт защищаемого РЛС,

и имитатора излучения РЛС, расположенного на удаленной позиции, позволяющий создать неопределенность положения РЛС на местности.

**Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации** состоит в следующем:

1. Результаты работы по выявлению содержания и возможных подходов к организации защиты РЛС от средств РТР с использованием средств радиоподавления могут быть использованы при определении способов защиты РЛС от различных угроз, связанных с действием средств РТР, на ранних этапах проектирования РЛС.

2. Технически реализуемые предложения по организации защиты РЛС от средств РТР, разработанные в диссертации, могут быть использованы при разработке новых и модернизации существующих образцов РЛС и средств их защиты.

3. Разработанный в диссертации аппарат анализа эффективности защиты РЛС от средств РТР, основанный на определении количественных показателей методом модельного эксперимента, может быть использован при проведении аналогичных работ, что позволит экономить материальные и временные ресурсы.

#### **Личный вклад**

Автором разработаны новые технически реализуемые предложения по защите РЛС от средств РТР методами радиоподавления и показатели их эффективности, а также описательные, математические и компьютерные имитационные модели, а также проведен анализ эффективности разработанных предложений методом модельного эксперимента.

#### **Внедрение результатов**

Результаты диссертационной работы, а именно разработанный методический аппарат анализа защищенности РЛС от средств РТР методами шумовой маскировки использован на предприятии ПАО «НПО «Алмаз» в ОКР «Триумфатор-М» и ОКР «Триумфатор-М1», что подтверждено соответствующим актом внедрения (см. Приложение А).

**Методы исследования**, использованные в диссертационной работе, включают системный и математический анализ, теорию вероятностей и математическую статистику, теорию статистической радиотехники и теорию радиоэлектронной борьбы, компьютерное имитационное моделирование.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Предложенный способ защиты РЛС от средств РТР, основанный на прицельной по времени маскировке излучения РЛС шумовыми импульсами (ШИ) «накрывающего» или «ответного» типа, позволяет обеспечить электромагнитную совместимость защищаемого РЛС и средств активных помех (САП) прикрытия РЛС по каналу прямого распространения ШИ на трассе «САП - РЛС» при размещении САП на позиции и на платформе РЛС.

2. Предложенный способ защиты РЛС от средств РТР, основанный на использовании средств шумовой маскировки излучения РЛС, размещаемых на позиции защищаемого РЛС и построенных на базе традиционных средств защиты РЛС от противорадиолокационных управляемых ракет (ПРУР) путем реализации в этих средствах дополнительного режима «Защита от средств РТР», позволяет снизить суммарные затраты на защиту РЛС от средств РТР и ПРУР, при этом применительно к РЛС малой и средней дальности с характеристиками, рассмотренными в работе, реализуется шумовая маскировка бокового излучения в угловых секторах, где уровни боковых лепестков ДН защищаемого РЛС не превышают ( $-50 \dots -30$ ) дБ.

3. Предложенный способ защиты РЛС от средств РТР, основанный на применении встроенных в РЛС средств шумовой маскировки излучения и использующих антенну и передающее устройство РЛС, позволяет обеспечить маскировку как бокового, так и зондирующего излучения РЛС за счет использования только собственного энергетического ресурса РЛС, при этом требуемая величина  $q_{\text{МШ/ЗС}}$  отношения мощностей маскирующего шума (МШ) и зондирующего сигнала (ЗС) зависит от вероятностей  $D_{\text{РТР}}$  и  $F_{\text{РТР}}$  правильного обнаружения и ложной тревоги обнаружителя из состава подавляемого

средства РТР, а уменьшение дальности радиолокации, возникающее из-за действия шумовых эхоимпульсов от лоцируемых объектов, может быть установлено на допустимом уровне путем соответствующего увеличения базы зондирующего сигнала РЛС.

**Достоверность** полученных результатов работы подтверждается применением корректных математических и описательных моделей, отсутствием противоречий между теоретическими предположениями и полученными результатами модельных экспериментов, а также логической обоснованностью выводов.

### **Апробация работы**

Материалы диссертационной работы обсуждались на 17-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2018» (Москва, МАИ, 2018 г.), международной молодежной научной конференции Гагаринские чтения – 2019 (Москва, МАИ, 2019 г.), 18-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2019» (Москва, МАИ, 2019 г.), международной молодежной научной конференции Гагаринские чтения – 2020 (Москва, МАИ, 2020 г.), международной научной конференции «2020 Systems of signals generating and processing in the field of onboard communications» (Москва, МТУСИ, 2020 г.), 19-й Международной конференции «Авиация и космонавтика» (Москва, МАИ, 2020 г.), 20-й Международной конференции «Авиация и космонавтика» (Москва, МАИ, 2021 г.).

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и одного приложения. Диссертация содержит 180 страниц текста, 74 рисунка, 9 таблиц. Список литературы включает 85 наименований.

## **1 Обоснование актуальности противодействия средствам РТР**

### **1.1 Общие сведения о современных средствах РТР**

В настоящее время конфликтное противоборство в спектре электромагнитных волн характеризуется возрастающей ролью РТР в информационном обеспечении действий войск. [32, 60]. Радиотехническая разведка является составной частью радиоэлектронной разведки и обеспечивает получение сведений о типе, назначении и местоположении работающих радиоэлектронных средств противника (радиолокационных, радионавигационных, радиотелеуправления), применяемых для обеспечения боевых действий и управления оружием, путем обнаружения, анализа параметров их излучений. Задачи, решаемые средствами РТР, включают [8, 50, 56, 63, 81]:

- обнаружение сигналов рабочего излучения РЛС;
- измерение радиотехнических параметров (энергетических, спектральных, временных, структурных, поляризационных) обнаруженных сигналов;
- сортировка обнаруженных сигналов по их источникам;
- определение параметров последовательностей обнаруженных сигналов;
- идентификация РЛС, его носителя и системы вооружения;
- пеленгование РЛС;
- определение расстояния до РЛС;
- оценка уровня опасности РЛС;
- формирование разведсообщения о РЛС.

Основные задачи, решаемые противной стороной с использованием информации от средств РТР [44]:

– планирование нанесения удара авиации по военным объектам (аэродромам, позициям зенитных ракетных комплексов, радиолокационным постам, отдельным РЛС и др.);

– планирование радиоэлектронного подавления и управление средствами индивидуальной и групповой РЭБ летательных аппаратов (выяснение загрузки диапазонов волн, общей интенсивности работы РЛС, типа, состояния объекта разведки, режимов работы и координаты средств ПВО);

– планирование рациональных маршрутов преодоления ПВО (с целью обхода стартовых позиций ЗРК либо, наоборот, с целью выхода на них для удара противорадиолокационными ракетами).

Опыт современных вооруженных конфликтов показал, что тактика нанесения авиационных ударов обязательно предусматривает огневое и радиоэлектронное подавление РЛС, входящих в состав комплексов ПВО [25]. Поскольку функционирование РЛС в условиях радиоэлектронного и огневого подавления является весьма сложной (а в ряде случаев практически невыполнимой) задачей, приобретают актуальность поиск и разработка новых способов и методов защиты РЛС от средств РТР. К основным направлениям обеспечения конфликтной устойчивости РЛС относится повышение её скрытности [26, 31, 58]. Кроме того, проблему повышения защищенности РЛС различного назначения от средств РТР (повышения скрытности РЛС) актуализирует достигнутый уровень развития теории и техники РТР.

## 1.2 Обзор традиционных методов защиты РЛС от средств РТР

На этапах разработки и эксплуатации РЛС на решение проблемы повышения защищенности РЛС от средств РТР (повышения скрытности или снижения разведываемости РЛС) могут быть направлены такие меры, как [5, 6, 7, 22, 24, 29, 30, 31, 33, 45-47, 51, 55, 56, 61, 66, 69]:

а) уменьшение импульсной мощности зондирующего излучения РЛС до минимально достаточных для решения собственных задач уровней;

б) снижение уровней побочных излучений, в том числе, излучений в направлениях боковых лепестков ДН антенны РЛС;

в) многопозиционное построение РЛС, в том числе с разнесенными передающими и приемными позициями;

г) использование пассивных режимов функционирования активных РЛС;

д) использование в РЛС трудноразведываемых (скрытных) зондирующих сигналов, характеризующихся следующими свойствами:

- пониженными уровнями импульсной мощности, протяженностью во времени и различными видами внутриимпульсной модуляции;

- широкополосностью, обеспечиваемой одновременным излучением на совокупности различных несущих частот, быстрой перестройкой несущей частоты (от импульса к импульсу, от пачки к пачке) по квазислучайному закону;

- перестройкой длительностей и периодов повторения импульсов, межимпульсных интервалов;

- перестройкой кодов внутриимпульсной модуляции несущего колебания (от импульса к импульсу, от пачки к пачке);

- формой в виде отрезков реализации шума или псевдошума (на несущей частоте или без несущей);

- формой в виде сверхкоротких радиоимпульсов (видеоимпульсов);

е) расширение ансамбля используемых сигналов;

з) сокращение времени излучения;

и) быстрая смена позиций.

Однако перечисленные меры оказываются эффективными не всегда и не в достаточной степени. Это объясняется, прежде всего, высокими уровнями развития современной техники РТР. Достижимые уровни чувствительности разведывательных приемников по импульсным сигналам составляют ( $-90\dots-100$ ) дБВт и выше, по непрерывным и квазинепрерывным сигналам ( $-110\dots-120$ ) дБВт и выше [3, 44, 45, 54, 63, 79]. Как правило, в современных средствах РТР реализуется мгновенный обзор рабочих угловых секторов (за счет использования слабонаправленных и многолучевых антенн) и рабочих диапазонов частот (за счет использования широкополосных и многоканальных по частоте приемных устройств) [31, 54, 56, 65]. Высоких уровней достигли также методы и средства измерения параметров, распознавания и сортировки обнаруживаемых сигналов, идентификации разведываемых РЭС, определения их носителей [54, 56, 65].

Другая причина недостаточной эффективности указанных выше традиционных мер повышения скрытности РЛС заключается в том, что они не всегда реализуемы. Например, оказывается проблематичным энергетическое скрывание РЛС, работающих в составе наземных средств ПВО (РЛС обнаружения ВЦ, РЛС наведения управляемых ракет (УР), многофункциональных РЛС зенитных и авиационных ракетных комплексов и др.). Эти РЛС являются, как правило, высокопотенциальными (импульсная мощность излучения достигает сотен киловатт), что диктуется необходимостью обнаружения и сопровождения малозаметных ВЦ на дальностях порядка нескольких сотен километров [35, 55, 56]. Скрывание параметров излучения РЛС путем их перестройки по труднопредсказуемым законам также не всегда позволяет достичь желаемого результата. Допустимая полоса перестройки несущей частоты РЛС обычно не превышает нескольких процентов от центральной частоты рабочей полосы. Кроме того, по данным некоторых исследований [16, 37, 80] применение широкополосных (ФКМ и ЛЧМ) сигналов не всегда обеспечивает достаточные уровни скрытности РЛС.

В свою очередь, применение шумовых сигналов не позволяет обнаруживать цели на приемлемых для решения задач ПВО дальностях [69]. Существуют и другие причины, затрудняющие решение задач снижения разведваемости РЛС (скрытия РЭС от средств РТР).

Проведенное рассмотрение позволяет сделать вывод, что современные средства РТР могут успешно решать задачи обнаружения, определения параметров излучения и идентификации высокопотенциальных РЛС, применяющих традиционные меры защиты от средств РТР.

Следует отметить, что в известных литературных источниках недостаточно отражены возможности современных средств РТР по местоопределению источников излучения [1, 3, 21, 25, 28, 33, 36, 44, 45, 53, 54, 59, 62, 63, 70, 71]. В частности, представляет интерес вопрос о способности современных средств РТР определять координаты РЛС с точностью, достаточной для формирования целеуказаний средствам поражения. Этот вопрос имеет весьма важное значение. При этом наибольший интерес представляет изучение возможностей местоопределения РЛС угломерным методом, который по ряду причин получил наибольшее распространение в современной технике РТР [25, 45, 56, 81, 83]. В частности, авиационная РТР, как правило, ведется с использованием бортовых пеленгаторов [44, 45, 56].

Для получения ответа на вышеуказанный вопрос автором лично (и в соавторстве с научным руководителем д.т.н. профессором Юдиным В.Н.) были проведены исследования достижимых средствами РТР уровней ошибок местоопределения РЛС, результаты которых опубликованы в работах [10-13, 72, 73, 84], и изложены далее в разделе 1.3.

### **1.3 Достижимые уровни ошибок местоопределения РЛС угломерным методом**

#### **1.3.1 Общие сведения о многопозиционной угломерной системе воздушной разведки на базе одиночного авиационного носителя**

Угломерный (пеленгационный) метод пассивной локации источников излучения (ИИ) широко известен и применяется в практике радиотехнической разведки (РТР). Изложение сущности метода содержится, например, в [59, 62]. Одной из основных задач, решаемых средствами радиотехнической разведки (РТР), является определение координат (местоопределение) выявленных источников излучения (ИИ). Для решения этой задачи средства РТР используют методы пассивной радиолокации. В отличие от активной радиолокации, где, благодаря использованию зондирующего излучения, координаты лоцируемых объектов могут быть определены с одной пространственной позиции, методы пассивной радиолокации обычно предполагают наличие нескольких (двух или более) пространственно разнесенных позиций. На каждой позиции расположены антенные устройства, аппаратура приема и анализа радиосигналов, а также средства обеспечения обмена информацией между позициями. В составе многопозиционной системы локации ИИ обычно имеется также пункт сбора и обработки информации (ПСОИ), расположенный на обособленной позиции либо на одной из приемных позиций.

Угломерный метод реализуется на базе совокупности пассивных радиопеленгаторов (РП), размещаемых на неподвижных или подвижных позициях, координаты которых известны на моменты пеленгования. Количество позиций пеленгования зависит от построения конкретных систем локации ИИ. Наземные системы используют не менее двух позиций. Воздушные системы могут быть реализованы на базе одиночного авиационного носителя [54, 56]. Известны также воздушные системы разведки

ИИ с двумя, тремя и более носителями [44]. Координаты позиций пеленгования определяются средствами спутниковой радионавигации. Координаты лоцируемых ИИ рассчитываются по совокупности полученных результатов пеленгования и координат позиций на моменты пеленгования.

Угломерный метод является позиционно зависимым. Это означает, что ошибки местоопределения ИИ зависят от взаимного положения лоцируемого ИИ и позиций пеленгования. Уровни ошибок местоопределения ИИ, характерные для угломерного метода, приведены в ряде источников, например, в [1, 21, 28]. В частности, в [28] содержатся сведения об угломерной системе, обеспечивающей среднеквадратическую ошибку местоопределения ИИ (т. н. «ошибку места») на уровне 200 м.

Угломерный метод пассивной локации ИИ обычно сравнивают с разностно-дальномерным [1], при этом сравнение по точностным характеристикам зачастую не в пользу угломерного метода. Тем не менее, с точки зрения сложности реализации в воздушной разведке угломерный метод явно предпочтительнее, так как может быть реализован на базе одиночного авиационного носителя (пилотируемого или беспилотного). Естественным путем повышения точностных характеристик угломерного метода является уменьшение ошибок пеленгования ИИ. Другой путь – увеличение объема обрабатываемой пеленговой информации. Речь идет об увеличении числа позиций пеленгования на маршруте движения ЛА-носителя пеленгатора. Этот путь связан с увеличением времени, требуемого для локации ИИ с повышенной точностью, за счет уменьшения скорости движения (полёта) носителя РП. Соответственно, он может дать эффект только применительно к ИИ, работающим на излучение достаточно продолжительное время. Другой подход к увеличению числа пеленгов на маршруте движения ЛА-носителя РП связан с уменьшением периода пеленгования. В этом случае предел уменьшения периода пеленгования соответствует минимально возможному периоду выдачи координатной

информации бортовой системой навигации ЛА-носителя РП. В настоящее время системы воздушной разведки на базе одиночного авиационного носителя признаются перспективными [54, 56].

В данном разделе рассматривается влияние увеличения объемов используемой пеленгационной информации на уровни ошибок местоопределения ИИ угломерным методом локации применительно к воздушной разведке на базе одиночного авиационного носителя. Следует отметить, что выявление высоких точностных возможностей метода (вплоть до уровней, достаточных для формирования целеуказаний средствам поражения) актуализирует вопросы противодействия угломерной пассивной радиолокации ИИ средствами радиоэлектронной борьбы.

Подход к оценке возможностей пеленгационного метода, принятый в данной работе, основан на анализе алгоритмов угломерной локации, оптимизированных по критериям наименьших квадратов (НК) и наибольшего правдоподобия (НП), методами компьютерного имитационного моделирования. Рассматривается задача локации ИИ на плоскости применительно к сценариям, представляющим практический интерес.

### **1.3.2 Постановка задачи локации источников излучения при работе угломерной системы**

В общем случае пеленгование ИИ может выполняться с  $N \geq 2$  разнесенных позиций  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_N$ , координаты которых в общей системе координат  $XOY$  составляют соответственно  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)$ . При этом возникает задача отыскания оценки  $(\hat{x}, \hat{y})$  координат ИИ на основе совокупности пеленгов  $(\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3, \dots, \hat{\beta}_N)$ , полученных соответственно на позициях  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_N$ . Каждый пеленг задает линию положения (ЛП) ИИ в виде прямой, проходящей через соответствующую позицию пеленгования.

В итоге после выполнения пеленгования ИИ с  $N$  позиций имеется совокупность линий положения:

$$\begin{aligned}
 \text{ЛП}_1 & \quad y = k_1(x - x_1) + y_1, \\
 \text{ЛП}_2 & \quad y = k_2(x - x_2) + y_2, \\
 & \dots\dots\dots \\
 & \dots\dots\dots \\
 \text{ЛП}_N & \quad y = k_N(x - x_N) + y_N,
 \end{aligned}
 \tag{1.2.1}$$

где  $k_1 = \text{tg}(\hat{\beta}_1)$ ,  $k_2 = \text{tg}(\hat{\beta}_2)$ , ...  $k_N = \text{tg}(\hat{\beta}_N)$  – угловые коэффициенты соответствующих ЛП.

Сказанное поясняется на рисунке 1.1, где кружками отмечены точки пересечения различных ЛП (1.2.1).

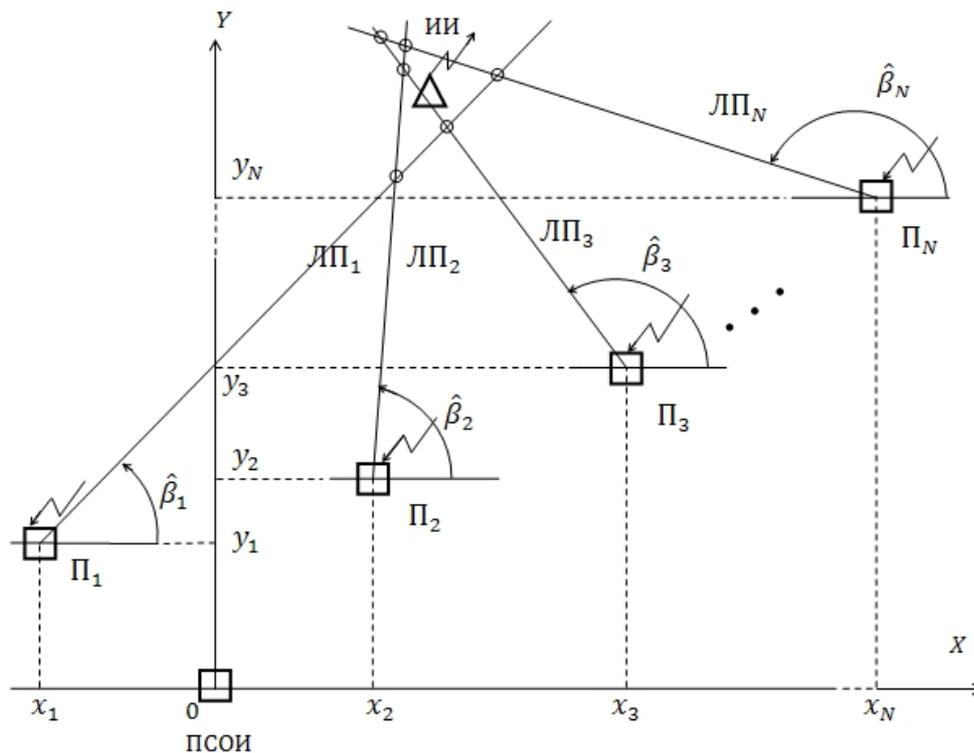


Рисунок 1.1 - Многопозиционная угломерная локация на плоскости

Из рассмотрения рисунка 1.1, можно сделать вывод, что, располагая линиями положения  $\text{ЛП}_1, \text{ЛП}_2, \dots, \text{ЛП}_N$ , логично в качестве искомой точки  $(\hat{x}, \hat{y})$

взять точку, наиболее близкую (в смысле некоторого критерия), ко всем полученным ЛП по сравнению с любыми другими точками. Оценки координат ИИ, полученные с использованием упомянутого критерия, можно считать наилучшими (оптимальными) в смысле этого критерия.

### 1.3.2.1 Алгоритм определения координат источников излучения, оптимизированный по критерию наименьших квадратов

В соответствии с критерием НК в качестве искомой точки  $(\hat{x}, \hat{y})$  следует взять точку, сумма квадратов расстояний от которой до всех полученных линий положения ИИ – наименьшая по сравнению с любыми другими точками.

Для вывода соотношений, определяющих «НК – оценку» координат ИИ, преобразуем уравнения прямых, задающих линии положения ЛП<sub>n</sub>,  $n=1, 2, \dots, N$ , к виду

$$k_n x - y - k_n x_n + y_n = 0$$

(стандартный вид  $Ax + Bx + C = 0$ ). На плоскости измерения выберем произвольным образом точку  $(u, v)$ . Расстояние  $l_n$  от точки  $(u, v)$  до прямой ЛП<sub>n</sub>, согласно [17], равно

$$l_n = \frac{Au + Bu + C}{\sqrt{A^2 + B^2}} = \frac{k_n u - v - k_n x_n + y_n}{\sqrt{k_n^2 + 1}}. \quad (1.3.2)$$

Сумма квадратов расстояний от точки  $(u, v)$  до всех  $N$  линий положения

$$S = \sum_{n=1}^N l_n^2 = \sum_{n=1}^N \frac{(k_n u - v - k_n x_n + y_n)^2}{k_n^2 + 1}. \quad (1.3.3)$$

Условие минимума функции двух переменных (3) имеет вид

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial u} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial v} = 0 \end{cases}. \quad (1.3.4)$$

Вычислив частные производные, фигурирующие в (1.3.4), приходим к системе линейных уравнений

$$\begin{cases} a_1 u + b_1 v + c_1 = 0 \\ a_2 u + b_2 v + c_2 = 0 \end{cases},$$

в которой

$$\begin{aligned} a_1 &= \sum_{n=1}^N \frac{2k_n^2}{k_n^2 + 1}; & b_1 &= -\sum_{n=1}^N \frac{2k_n^2}{k_n^2 + 1}; & c_1 &= \sum_{n=1}^N \frac{2k_n(y_n - k_n x_n)}{k_n^2 + 1}; \\ a_2 &= -\sum_{n=1}^N \frac{2k_n^2}{k_n^2 + 1}; & b_2 &= \sum_{n=1}^N \frac{2}{k_n^2 + 1}; & c_2 &= -\sum_{n=1}^N \frac{2(y_n - k_n x_n)}{k_n^2 + 1}. \end{aligned}$$

Решение этой системы имеет вид

$$\begin{aligned} u &= \hat{x}_{HK} = \frac{b_1(a_1 c_2 - a_2 c_1) - c_1(a_1 b_2 - a_2 b_1)}{a_1(a_1 b_2 - a_2 b_1)}; \\ v &= \hat{y}_{HK} = -\frac{(a_1 c_2 - a_2 c_1)}{(a_1 b_2 - a_2 b_1)}. \end{aligned} \quad (1.3.5)$$

Соотношения (1.3.5) определяют на плоскости измерения точку, наиболее близкую в смысле критерия НК ко всем ЛП (1.2.1).

С использованием матрично-векторного аппарата линейной алгебры полученные соотношения могут быть представлены более компактно. Система  $N$  линейных уравнений, составленная на основе (1.2.1), имеет, как известно [65] матрично-векторное представление вида

$$\vec{A}\vec{x} = \vec{b}, \quad (6)$$

где

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} -k_1 & 1 \\ -k_2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -k_N & 1 \end{pmatrix} - \text{матрица коэффициентов размера } (N \times 2);$$

$$\vec{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} - \text{вектор неизвестных (подлежащих отысканию координат ИИ)}$$

размера  $(N \times 1)$ ;

$$\vec{b} = \begin{pmatrix} -k_1 x_1 + y_1 \\ -k_2 x_2 + y_2 \\ \vdots \\ -k_N x_N + y_N \end{pmatrix} - \text{вектор «невязок» размера } (N \times 1).$$

Решение системы (6), отвечающее критерию НК, имеет вид [64]

$$\hat{x} = \hat{x}_{НК} = \begin{pmatrix} \hat{x}_{НК} \\ \hat{y}_{НК} \end{pmatrix} = (\vec{A}^T \vec{A})^{-1} \vec{A}^T \vec{b}. \quad (1.3.7)$$

Расчетные соотношения (1.3.5) и (1.3.7), определяющие НК – оценки  $(\hat{x}, \hat{y})$  координат ИИ, в рассматриваемом случае эквивалентны.

### 1.3.2.2 Алгоритм локации источника излучения, оптимизированный по критерию наибольшего правдоподобия

Располагая результатами первичного измерения в виде совокупности  $(\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_N)$  оценок (пеленгов ИИ), полученных на позициях пеленгования  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_N$ , можно сформировать апостериорное распределение вероятностей координат  $x, y$  лоцируемого ИИ. Для этого рассмотрим совместное распределение вероятностей искомых величин  $x, y$  и результатов первичных измерений  $(\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_N)$  на основе общего соотношения для формулы полной вероятности [18]

$$p(x, y, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_N) = p(x, y)p(\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_N / x, y) = p(\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_N)p(x, y / \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_N)$$

Отсюда апостериорная плотность распределения вероятностей (п.р.в.)

$$p(x, y / \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_N) = \frac{p(x, y)p(\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_N / x, y)}{p(\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_N)} \quad (1.4.1)$$

В этом соотношении  $p(x, y)$  – априорная п.р.в. координат ИИ;  $p(\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_N / x, y) = f_{np}(x, y)$  – условная п.р.в. (функция правдоподобия) результатов первичных измерений (наблюдений);

$$p(\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_N) = \iint p(\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_N / x, y)p(x, y)dx dy \quad (1.4.2)$$

– значение функции правдоподобия наблюдений  $(\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_N)$ , усредненное по всем возможным координатам  $(x, y)$ . Искомая оценка  $(\hat{x}, \hat{y})$  координат ИИ, оптимизированная по критерию наибольшей апостериорной вероятности максимизирует п.р.в. (1.4.1), то есть, справедливо:

$$(\hat{x}, \hat{y}) = (\hat{x}_{HAB}, \hat{y}_{HAB}) = \arg \max_{x, y} p(x, y / \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_N) \quad (1.4.3)$$

Рассматривая соотношение (3), учтем следующее. Во-первых, если вид априорной п.р.в.  $p(x, y)$  неизвестен, то эту п.р.в. логично считать равномерной в некоторой зоне. При таком предположении сомножитель  $p(x, y)$  не влияет на положение максимума апостериорной п.р.в. (1.4.1). Во-вторых, присутствующая в (1.4.1) безусловная п.р.в.  $p(\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_N)$  не является функцией координат  $x, y$  и поэтому также не влияет на положение максимума функции (1.4.1). С учетом сказанного вместо (1.4.3) справедливо

$$(\hat{x}, \hat{y}) = (\hat{x}_{HAB}, \hat{y}_{HAB}) = (\hat{x}_{HP}, \hat{y}_{HP}) = \arg \max_{x, y} p(\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3 \dots \hat{\beta}_N / x, y) \quad (1.4.4)$$

Соотношение (1.4.4), в отличие от (1.4.3), предполагает максимизацию по  $(x, y)$  функции правдоподобия  $f_{np}(x, y) = p(\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_N / x, y)$  вместо апостериорной п.р.в. (1.4.1). Таким образом, величина (1.4.4) – это оценка

координат ИИ по максимуму функции правдоподобия, иначе говоря, «НП-оценка» координат ИИ.

Вид функции правдоподобия определяется распределением вероятностей ошибок пеленгования  $\tilde{\beta}_1, \tilde{\beta}_2, \dots, \tilde{\beta}_N$  на позициях  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_N$ . Эти ошибки представляют собой разности  $\tilde{\beta}_n = \hat{\beta}_n - \beta_n$ , где  $\beta_n$  - истинное направление на ИИ с позиции  $\Pi_n$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$  - величина неслучайная. Пеленгование ИИ выполняется на различных позициях независимо, поэтому справедливо  $p(\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_N / x, y) = \prod_{n=1}^N p(\hat{\beta}_n / x, y)$ .

Далее, поскольку оценка  $\hat{\beta}_n$  есть сумма истинного пеленга и ошибки пеленгования, то есть  $\hat{\beta}_n = \tilde{\beta}_n + \beta_n$ , применяя правило композиции законов распределения вероятностей [18], получим

$$f_{np}(x, y) = p(\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_N / x, y) = \prod_{n=1}^N p_{\tilde{\beta}_n}(\hat{\beta}_n - \beta_n / x, y) = \prod_{n=1}^N p_{\tilde{\beta}_n}(\tilde{\beta}_n / x, y), \quad (1.4.5)$$

где  $p_{\tilde{\beta}_n}(\tilde{\beta}_n / x, y)$  - одномерная п.р.в. ошибки  $n$ -го первичного измерения. Случайные ошибки первичных измерений, как обычно полагают, имеют гауссовское распределение вероятностей [59, 71], при этом функция правдоподобия (5) может быть представлена в следующем виде

$$f_{np}(x, y) = \prod_{n=1}^N \frac{1}{2\pi\sigma_{\tilde{\beta}_n}} \exp\left\{-\frac{\tilde{\beta}_n^2(x, y)}{2\sigma_{\tilde{\beta}_n}^2}\right\}, \quad (1.4.6)$$

где  $\sigma_{\tilde{\beta}_n}$  - среднеквадратическая ошибка (СКО) пеленгования. Функция (1.4.6) непригодна для отыскания оценки наибольшего правдоподобия  $(\hat{x}_{НП}, \hat{y}_{НП})$  на основе (1.4.4), так как в ней отсутствует в явном виде функциональная зависимость от координат  $(x, y)$ . Эту зависимость можно найти, рассматривая взаимосвязь между ошибкой  $\tilde{\beta}_n$  первичного измерения и ошибкой  $\tilde{l}_{ЛПn}$  линии положения ЛП<sub>n</sub>, соответствующей пеленгу  $\hat{\beta}_n$ ,

$n = 1, 2, \dots, N$ . Величина  $\tilde{l}_{III n}$  – расстояние от позиции ИИ до прямой ЛП<sub>n</sub> (отрезок перпендикуляра, опущенного на прямую ЛП<sub>n</sub> из точки  $(x_{III}, y_{III})$ ). Обсуждаемая взаимосвязь определяется приближенным соотношением

$$\tilde{\beta}_n \approx \frac{\tilde{l}_{III n}}{r_n}, \quad (1.4.7)$$

где  $r_n$  – расстояние от позиции пеленгования П<sub>n</sub> до ИИ. Как известно [17], расстояние от произвольной точки  $(u, v)$  до прямой  $ax + by + c = k_n x - y - k_n x_n - y_n = 0$ , задающей линию положения ЛП<sub>n</sub>, определяется как  $\frac{au + bv + c}{\sqrt{a^2 + b^2}} = \frac{k_n u - v - k_n x_n - y_n}{\sqrt{k_n^2 + 1}}$ .

Здесь  $x_n, y_n$  суть координаты позиции пеленгования П<sub>n</sub>;  $k_n$  - угловой коэффициент прямой ЛП<sub>n</sub>, проходящей через точку  $(x_n, y_n)$ ;  $n = 1, 2, \dots, N$ . Это позволяет определить ошибку пеленгования (1.4.7) как

$$\tilde{\beta}_n \approx \frac{k_n}{r_n \sqrt{k_n^2 + 1}} (x - x_n) - \frac{1}{r_n \sqrt{k_n^2 + 1}} (y - y_n).$$

Соответственно для функции правдоподобия  $f_{np}(x, y) = p(\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_N / x, y)$  справедливо

$$f_{np}(x, y) = \prod_{n=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{\tilde{\beta}_n}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \frac{k_n(x - x_n) - (y - y_n)}{r_n \cdot \sigma_{\tilde{\beta}_n} \cdot \sqrt{k_n^2 + 1}} \right]^2 \right\}.$$

После преобразований это соотношение приводится к виду

$$f_{np}(x, y) = G \exp \{ Ax^2 + 2Bxy + Cy^2 + 2Dx + 2Ey + F \}, \quad (1.4.8)$$

где обозначено:

$$\begin{aligned}
A &= -\sum_{n=1}^N \frac{k_n^2}{2 \cdot r_n^2 \cdot \sigma_{\tilde{\beta}_n}^2 \cdot (k_n^2 + 1)} ; & B &= \sum_{n=1}^N \frac{k_n}{2 \cdot r_n^2 \cdot \sigma_{\tilde{\beta}_n}^2 \cdot (k_n^2 + 1)} ; \\
C &= -\sum_{n=1}^N \frac{1}{2 \cdot r_n^2 \cdot \sigma_{\tilde{\beta}_n}^2 \cdot (k_n^2 + 1)} ; & D &= -\sum_{n=1}^N \frac{k_n (y_n - k_n \cdot x_n)}{2 \cdot r_n^2 \cdot \sigma_{\tilde{\beta}_n}^2 \cdot (k_n^2 + 1)} ; & (1.4.9) \\
E &= \sum_{n=1}^N \frac{y_n - k_n \cdot x_n}{2 \cdot r_n^2 \cdot \sigma_{\tilde{\beta}_n}^2 \cdot (k_n^2 + 1)} ; & F &= -\sum_{n=1}^N \frac{(y_n - k_n \cdot x_n)^2}{2 \cdot r_n^2 \cdot \sigma_{\tilde{\beta}_n}^2 \cdot (k_n^2 + 1)} ; \\
G &= \prod_{n=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\tilde{\beta}_n}}} .
\end{aligned}$$

Максимальное значение функции правдоподобия  $f_{np}(x, y)$  достигается, когда максимизируется функция  $\lambda(x, y) = Ax^2 + 2Bxy + Cy^2 + 2Dx + 2Ey + F$ , которая является аргументом экспоненты в (1.4.8). Точка максимума функции  $f_{np}(x, y)$  определяет «НП-оценки» координат ИИ. Рассматривая задачу на отыскание максимума функции  $\lambda(x, y)$ , нетрудно убедиться, что соотношения, определяющие «НП – оценку» координат ИИ, имеют вид

$$\hat{x}_{нп} = \frac{BE - CD}{AC - B^2} ; \quad \hat{y}_{нп} = \frac{BD - AE}{AC - B^2} . \quad (1.4.10)$$

### 1.3.3 Описание модели

Анализ характеристик точности оценок (1.3.5), (1.4.10) был выполнен с использованием компьютерной модели, имитирующей процесс определения координат ИИ угломерным методом при полете ЛА - носителя РП по заданной траектории. Определяемая по результатам эксперимента характеристика точности оценки - «ошибка места»  $\delta$  рассчитывалась на основе соотношения

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N_{МК}} \sum_{i=1}^{N_{МК}} [(\hat{x}_i - x_{ИИ})^2 + (\hat{y}_i - y_{ИИ})^2]}. \quad (1.4.11)$$

где  $x_{ИИ}$  и  $y_{ИИ}$  истинные координаты лоцируемого ИИ;  $N_{МК}$  - количество испытаний Монте-Карло при определении ошибки места.

Было принято, что отсчеты пеленга ИИ поступают с периодом 1 с, ошибка пеленгования – гауссовская случайная величина [59, 71] с нулевым математическим ожиданием (систематическая ошибка отсутствует) и задаваемым среднеквадратическим отклонением (СКО)  $\sigma$ , число испытаний  $N_{МК} = 10000$ . Расчеты выполнены для двух типов траекторий полета ЛА-носителя РП – прямолинейной и круговой.

### 1.3.4 Результаты модельного эксперимента

#### 1.3.4.1 Прямолинейная траектория ЛА-носителя РП

Носитель РП движется с постоянной скоростью по прямолинейной траектории. Лоцируемый ИИ расположен в вершине равнобедренного треугольника (точка А на рисунке 1.2), основанием которого является отрезок, соединяющий начальную (В) и конечную (С) точки траектории ЛА-носителя РП. Длина отрезка ВС равна 30 км, высота треугольника  $R$  (кратчайшее расстояние между ИИ и ЛА-носителем РП (наименьшее удаление ЛА от лоцируемого ИИ) при полете по траектории).

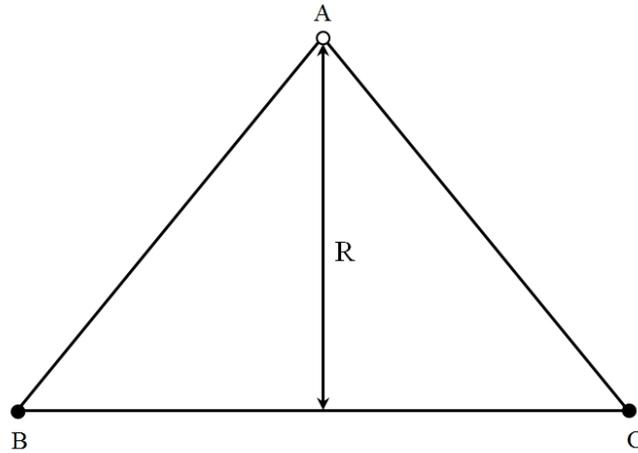


Рисунок 1.2 - Прямолинейная траектория ЛА-носителя РП.

На рисунке 1.3 представлены полученные путём моделирования на основе формулы (1.4.11) зависимости величины среднеквадратической ошибки места  $\delta$  от СКО ошибки пеленгования  $\sigma_{\text{пел}}$  при различных значениях расстояния  $R$  (10; 20; и 30 км) применительно к случаям использования для расчетов координат ИИ («НК-оценок» (1.3.5) и «НП-оценок» (1.4.10)) при постоянной скорости полета ЛА  $V=100$  км/ч. Указанное значение скорости характерно для беспилотных летательных аппаратов. Приведены шесть кривых, соответствующих различным значениям  $R$  и различным алгоритмам оценивания координат ИИ: кривая 1 – «НК-оценка» при  $R=10$  км; кривая 2 – «НП-оценка» при  $R=10$  км; кривая 3 – «НК-оценка» при  $R=20$  км; кривая 4 – «НП-оценка» при  $R=20$  км; кривая 5 – «НК-оценка» при  $R=30$  км; кривая 6 – «НП-оценка» при  $R=30$  км.

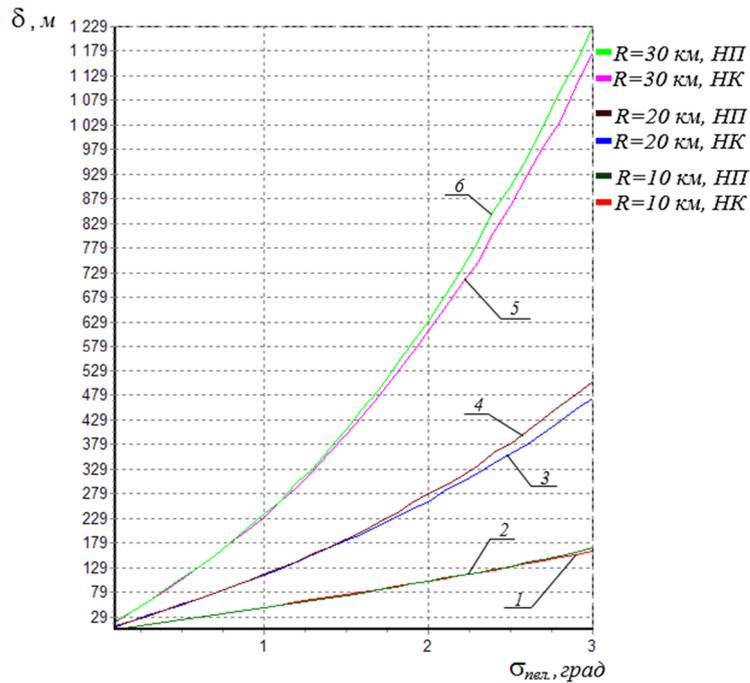


Рисунок 1.3 - Зависимость среднеквадратической ошибки места  $\delta$  от СКО ошибки пеленгования  $\sigma_{\text{пел}}$  при полете ЛА-носителя РП по прямолинейной траектории

На рисунке 1.4 представлены полученные путём моделирования на основе формулы (1.4.11) зависимости величины среднеквадратической ошибки места  $\delta$  от СКО ошибки пеленгования  $\sigma_{\text{пел}}$  при различных значениях расстояния  $R$  (10; 20; и 30 км) применительно к случаям использования для расчетов координат ИИ («НК-оценок» (1.3.5) и «НП-оценок» (1.4.10)) при фиксированном значении СКО  $\sigma_{\text{пел}}=1,4^\circ$ . Данное значение ошибки пеленгования характерно для двухбазовых фазовых интерферометров фирмы Raven Electronics [54]. На рисунке 1.4, так же как и на рисунке 1.3, представлены шесть кривых, соответствующих различным значениям  $R$  (обозначения кривых соответствуют описанным для рисунка 1.3).

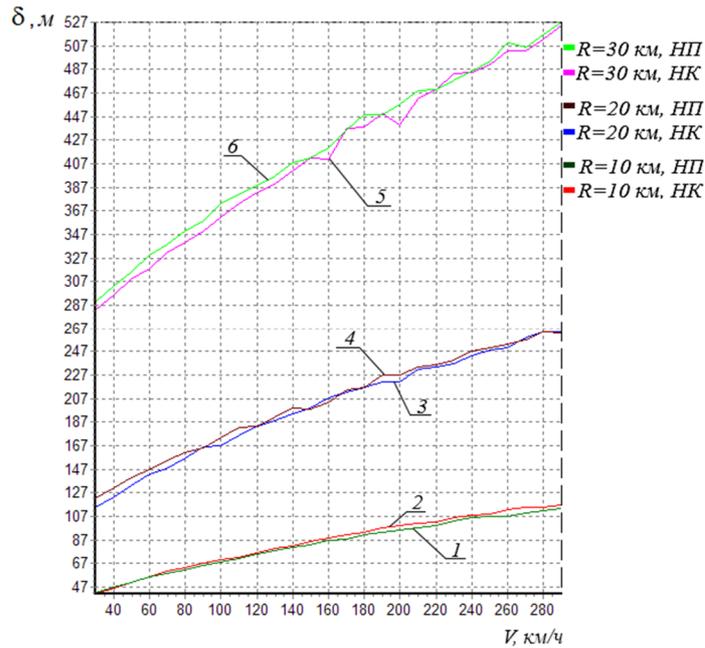


Рисунок 1.4 - Зависимость среднеквадратической ошибки места  $\delta$  от скорости полета  $V$  ЛА-носителя РП по прямолинейной траектории при

$$\sigma_{\text{пол}}=1,4^\circ$$

### 1.3.4.2 Круговая траектория ЛА-носителя РП

В данном случае носитель РП движется с постоянной скоростью  $V$  по окружности радиусом  $R$  с центром в точке расположения лоцируемого ИИ (Рисунок 1.5).

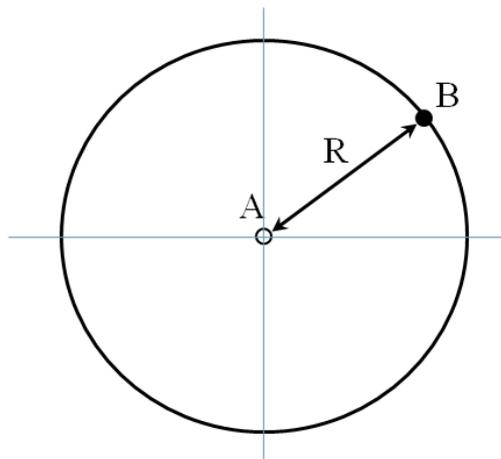


Рисунок 1.5 - Круговая траектория ЛА-носителя РП.

На рисунке 1.6 представлены рассчитанные на основе формулы (1.4.11) зависимости величины среднеквадратической ошибки места  $\delta$  от СКО ошибки пеленгования  $\sigma_{\text{пел}}$  при различных значениях расстояния  $R$  (10; 20; и 30 км) применительно к случаям использования для расчетов координат ИИ («НК-оценок» (1.3.5) и «НП-оценок» (1.4.10)) при постоянной скорости полета ЛА  $V=100$  км/ч. График содержит шесть кривых, соответствующих различным значениям  $R$  и различным алгоритмам оценивания координат ИИ: кривая 1 – «НК-оценка» при  $R=10$  км; кривая 2 – «НП-оценка» при  $R=10$  км; кривая 3 – «НК-оценка» при  $R=20$  км; кривая 4 – «НП-оценка» при  $R=20$  км; кривая 5 – «НК-оценка» при  $R=30$  км; кривая 6 – «НП-оценка» при  $R=30$  км.

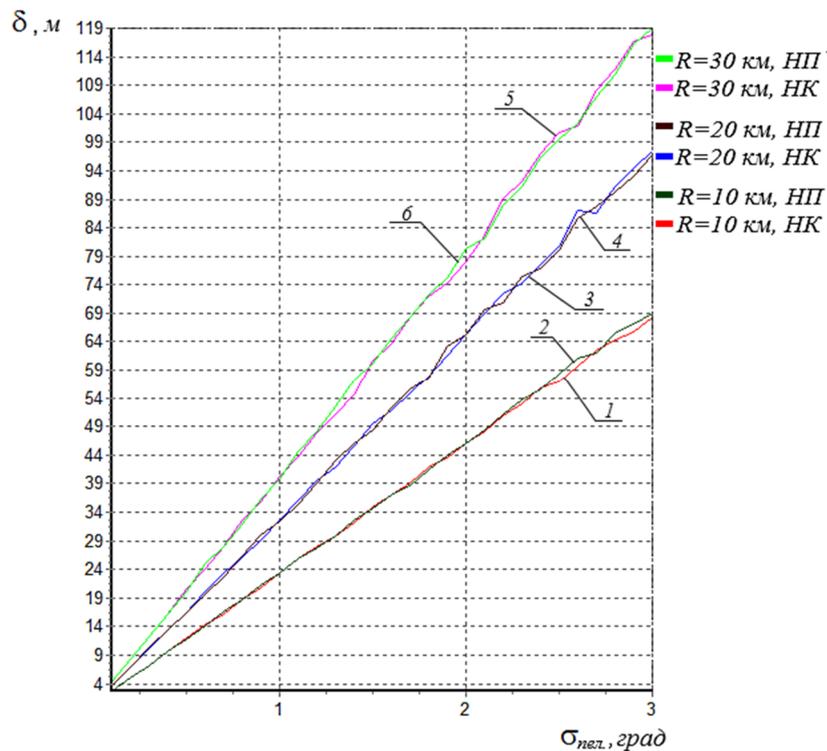


Рисунок 1.6 - Зависимость среднеквадратической ошибки места  $\delta$  от СКО ошибки пеленгования  $\sigma_{\text{пел}}$  при полете ЛА-носителя РП по круговой траектории

На рисунке 1.7 представлены рассчитанные на основе формулы (1.4.11) зависимости величины среднеквадратической ошибки места  $\delta$  от СКО ошибки пеленгования  $\sigma_{\text{пел}}$  при различных значениях расстояния  $R$  (10; 20; и 30 км) применительно к случаям использования для расчетов координат ИИ («НК-оценок» (1.3.5) и «НП-оценок» (1.4.10)) при фиксированном значении СКО  $\sigma_{\text{пел}}=1,4^\circ$ . График содержит шесть кривых, соответствующих различным значениям  $R$  и различным алгоритмам оценивания координат ИИ (обозначения кривых соответствуют описанным для рисунка 1.6).

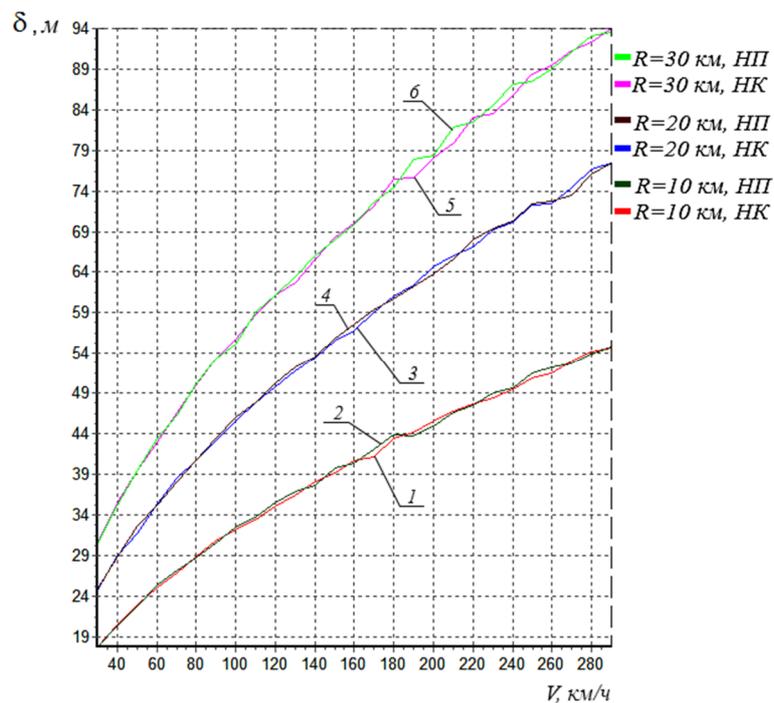


Рисунок 1.7 - Зависимость среднеквадратической ошибки места  $\delta$  от скорости полета  $V$  ЛА-носителя РП по круговой траектории при  $\sigma_{\text{пел}}=1,4^\circ$

В таблицах 1.1 и 1.2 приведены результаты расчета параметров эллипсов ошибок для конкретных значений скорости полета ЛА-носителя РП и СКО ошибок пеленгования для прямолинейной и круговой траекторий применительно к случаю использования «НК-оценок». Параметры эллипса ошибок (полуоси и ориентация главной оси) поясняются на рисунке 1.8. При расчетах принято, что вероятность попадания результата однократного измерения в пределы эллипса  $P = 0,99$ , СКО ошибки пеленгования  $\sigma_{\text{пел}}=1,4^\circ$

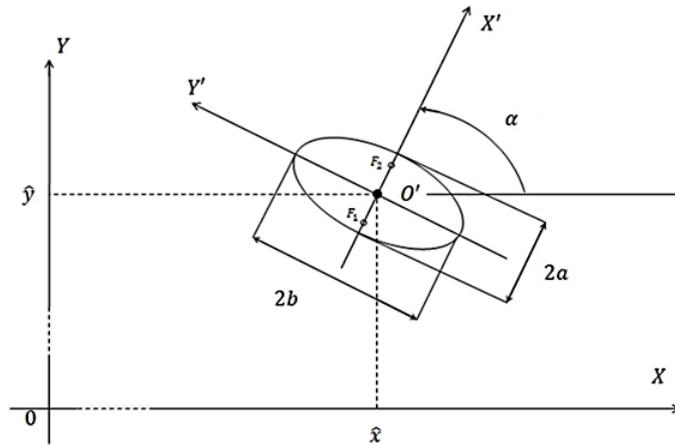


Рисунок 1.8 – Эллипс ошибок

Таблица 1.1 - Параметры эллипса ошибок при полете ЛА-носителя РП по прямолинейной траектории

Расстояние по нормали до ИИ, км	Путевая скорость полета, км/ч	Число пеленгов	Малая полуось эллипса ошибок, м	Большая полуось эллипса ошибок, м	Угол поворота эллипса ошибок, градус	Площадь эллипса ошибок, м <sup>2</sup>
20	100	3600	52	95	1	15200
	200	1800	72	117	2	26700
	400	900	103	150	-0,7	48500

Таблица 1.2 - Параметры эллипса ошибок при полете ЛА-носителя РП по круговой траектории

Расстояние до ИИ, км	Путевая скорость полета, км/ч	Число пеленгов	Малая полуось эллипса ошибок, м	Большая полуось эллипса ошибок, м	Угол поворота эллипса ошибок, градус	Площадь эллипса ошибок, м <sup>2</sup>
20	100	4523	30	30	39	2900
	200	2261	43	43	18	5900
	400	1130	61	62	25	12000

### 1.3.5 Обсуждение результатов модельного эксперимента

Приведенные выше результаты модельного эксперимента указывают на следующее:

1. Главными факторами, определяющими достижимые уровни ошибок угломерной локации ИИ, являются:

- уровень СКО ошибок пеленгования используемого РП (параметр  $\sigma_{\text{пел}}$ );
- удаление траектории ЛА-носителя РП от лоцируемого ИИ (параметр  $R$ );
- форма траектории ЛА-носителя РП;
- путевая скорость  $V$  движения ЛА-носителя РП по траектории.

2. При круговой траектории ЛА-носителя РП уровни ошибок местоопределения ИИ, достигаемые при использовании «НП-оценок» и «НК-оценок» координат ИИ, практически одинаковы (см. рисунок 1.6 и 1.7). То есть, «НП-оценки» и «НК-оценки» при круговой траектории можно считать равноточными.

3. При линейной траектории ЛА-носителя РП «НП-оценки» проигрывают по точности «НК-оценкам», что видно из рисунков 1.3 и 1.4. Величина проигрыша зависит от значений параметров  $\sigma_{\text{пел}}$ ,  $R$ ,  $V$ . В частности, при  $\sigma_{\text{пел}}=3^\circ$ ,  $R=30$  км и  $V=100$  км/ч значение проигрыша «НП-оценки» по величине ошибки места  $\delta$  приближается к 50 м (см. рисунок 1.3). При  $\sigma_{\text{пел}}=3^\circ$  это значение – наибольшее из зафиксированных в рассматриваемом модельном эксперименте. С уменьшением расстояния  $R$  проигрыш «НП-оценки» по отношению к «НК-оценке» уменьшается и при  $R=10$  км не превышает единиц метров (см. рисунок 1.3).

Причина наличия проигрыша «НП-оценок» координат ИИ по отношению к «НК-оценкам» по величине среднеквадратической ошибки места  $\delta$  понятна. Она состоит в том, что «НП-оценки» (1.4.10) требуют для своего формирования знания расстояний  $r_n$  ( $n=1, 2, \dots, N$ ) между лоцируемым ИИ и каждой позицией пеленгования (1.4.9). На практике эти расстояния неизвестны, они оцениваются по результатам пеленгования на каждой

позиции, начиная с третьей, например, на базе метода НК. При круговой траектории расстояния от ИИ до всех позиций пеленгования одинаковы и влияние указанного недостатка ослабевает. Значение обсуждаемого проигрыша уменьшается при повышении точности пеленгования ИИ (уменьшении величины  $\sigma_{\text{пел}}$ ). Так, при  $\sigma_{\text{пел}} = 1^\circ$  и  $V=100$  км/ч «НП-оценки» и «НК-оценки» при всех рассматриваемых расстояниях  $R$  практически равноточны (см. рисунок 1.6). Это объясняется тем, что при выводе алгоритма «НП-оценки» использовано приближение (1.4.7), которое имеет большую точность при меньших значениях ошибок первичных измерений.

4. Уменьшение параметра  $R$ , то есть приближение траектории ЛА-носителя РП к позиции лоцируемого ИИ, приводит к существенному уменьшению среднеквадратической ошибки места  $\delta$  как при линейной, так и при круговой траектории, что видно из рисунков 1.3, 1.4, 1.6, 1.7.

5. Увеличение скорости полета ЛА-носителя РП приводит к увеличению среднеквадратической ошибки места  $\delta$  как при линейной, так и при круговой траектории, что видно из рисунок 1.4, 1.7. Следовательно, уменьшение скорости полета, ведущее к увеличению времени наблюдения и увеличению числа позиций пеленгования  $N$ , иначе говоря, наращивание объемов пеленговой информации, используемой при формировании «НП-оценок», как и следовало ожидать, приводит к существенному снижению уровней среднеквадратической ошибки места  $\delta$  – на это указывают все результаты обсуждаемого модельного эксперимента.

6. Результаты модельного эксперимента показывают, что при угломерной локации ИИ на базе одиночного ЛА-носителя РП возможно достижение весьма низких уровней ошибок местоопределения ИИ. В частности, основываясь на приведенных графических данных, можно констатировать следующее:

- при прямолинейной траектории ЛА-носителя РП,  $\sigma_{\text{пел}}=1^\circ$ ,  $V=100$  км/ч и  $R = 30; 20; \text{ и } 10$  км среднеквадратическая ошибка места  $\delta$  не превышает соответственно 240; 120; и 50 м (см. рисунок 1.3).

- при круговой траектории ЛА-носителя РП  $\sigma_{\text{пел}} = 1^\circ$ ,  $V=100$  км/ч и  $R=30; 20; \text{ и } 10$  км среднеквадратическая ошибка места  $\delta$  не превышает соответственно 40; 33; и 25 м (см. рисунок 1.6).

Важно отметить, что указанные достигаемые уровни среднеквадратической ошибки места  $\delta$  не являются предельными. Они могут быть существенно улучшены при увеличении числа позиций пеленгования  $N$  за счет увеличения частоты отсчетов пеленгов, уменьшения скорости полета ЛА-носителя РП, а также при уменьшении расстояния  $R$  и повышении точности пеленгования (уменьшении СКО  $\sigma_{\text{пел}}$ ).

Приведенные результаты свидетельствуют о значительных возможностях повышения точности угломерного метода пассивной радиолокации, реализуемого одиночным радиопеленгатором, размещенным на подвижном воздушном носителе, за счет увеличения объема обрабатываемой пеленгационной информации (количества пеленгов), формы траектории полета.

Результаты модельного эксперимента позволяют заключить, что угломерный метод локации ИИ, реализованный на базе одиночного авиационного носителя радиопеленгатора, позволяет достичь весьма высоких уровней точности местоопределения ИИ вплоть до единиц метров. Достижимые уровни могут быть достаточными для решения важных прикладных задач, в частности задач высокоточной радиотехнической разведки.

Проведенные исследования показывают, что современные средства РТР могут осуществлять местоопределение (высокопотенциальных) РЛС с точностью, достаточной для формирования целеуказаний средствам поражения (радиоэлектронного и огневого). Данное обстоятельство актуализирует задачу противодействия местоопределению РЛС средствами РТР.

#### **1.4 Выводы по разделу 1**

На основании указанных в пункте 1.2 обстоятельств, а также приведенных в пункте 1.3 расчетах можно сформулировать вывод о том, что современные средства РТР могут успешно решать задачи обнаружения, определения параметров излучения и идентификации РЛС, применяющих традиционные меры защиты от средств РТР. При этом координаты РЛС могут быть определены с точностью, достаточной для формирования целеуказаний средствам поражения.

Указанные причины обуславливают актуальность разработки подходов к повышению защищенности РЛС от средств РТР, отличающихся от традиционных. Один из таких подходов основан на радиоподавлении средств РТР в интересах защиты РЛС, суть которого, заключается в создании радиопомех средствам РТР, ведущим разведку защищаемых РЛС. Методы защиты РЛС от средств РТР, основанные на радиоподавлении, подробно рассматриваются в разделе 2, следуя материалам, опубликованным в работе автора в соавторстве с Юдиным В.Н. [15, 75].

## 2 Определение содержания и возможностей защиты РЛС от средств РТР методами радиоподавления

### 2.1 Сущность и классификация радиоподавления средств РТР в интересах защиты РЛС

Радиоподавление средств РТР противной стороны в интересах защиты своих РЛС реализуется с помощью специальных средств активных радиопомех (САП). В процессе функционирования защищаемого РЛС наряду с зондирующим излучением (излучение в пределах главного лепестка (ГЛ) ДН антенны РЛС и боковым излучением (излучение в направлениях боковых лепестков (БЛ) ДН РЛС) создаются излучения, противодействующие ведению разведки РЛС средствами РТР противной стороны (рисунок 2.1). На рисунке 2.1 обозначено: РЛС – радиолокационное средство; СРТР – средство радиотехнической разведки; САП – средство активных радиопомех;  $r_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}}$  – расстояние между защищаемым РЛС и СРТР;  $r_{\text{САП}}^{\text{СРТР}}$  – расстояние между САП и СРТР.

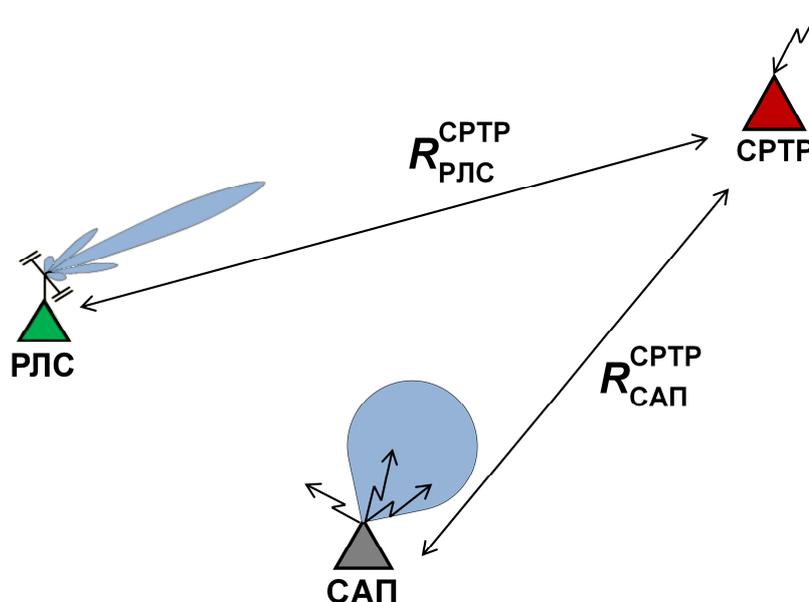


Рисунок 2.1 - Радиоподавление средств РТР противной стороны в интересах защиты своих РЛС

Общая задача САП – создание неопределенности (скрытие) факта присутствия, радиотехнических параметров (параметров излучения), пространственного положения, идентификационных параметров защищаемого РЛС для средств РТР противной стороны. Частными задачами, решаемыми САП, могут быть, например, маскировка бокового излучения РЛС, искажение спектра зондирующего излучения РЛС, противодействие пеленгованию РЛС, имитация излучения РЛС и другие. Если угловое направление на средство РТР, ведущее разведку защищаемого РЛС, известно на позиции САП, то радиопомехи могут излучаться прицельно в этом направлении (радиоподавление средства РТР, прицельное по направлению). В противном случае радиопомехи излучаются в некоторую угловую зону («разведопасную зону»), в пределах которой предполагается наличие средств РТР (радиоподавление средства РТР, заградительное по направлению). Что касается несущей частоты излучения САП, то, в зависимости от реализуемого типа и способа радиоподавления средства РТР, она может как совпадать с частотой защищаемого РЛС, так и отличаться от нее. Характер излучения САП (временная структура, частотный спектр, тип и параметры модуляции и т.д.) определяется реализуемым способом радиоподавления. Требуемая энергетика излучения САП зависит от взаимного пространственного положения и параметров САП, средства РТР и защищаемого РЛС, а также от решаемой задачи защиты РЛС.

Классификация радиоподавления средств РТР в интересах защиты РЛС возможна по принципу мешающего действия радиопомех на средства РТР, по размещению САП относительно защищаемого РЛС, а также по другим признакам.

*По принципу мешающего действия на средства РТР можно выделить следующие виды радиоподавления в интересах защиты РЛС:*

– маскировка излучения защищаемого РЛС;

- дезинформирование средств РТР относительно защищаемого РЛС путем имитации и искажения его излучения;
- комбинация различных видов радиоподавления.

*По размещению САП относительно защищаемого РЛС выделим следующие варианты организации защиты РЛС средствами радиоподавления:*

- защита с помощью САП, размещаемого на платформе защищаемого РЛС или встроенного в РЛС;
- защита с помощью САП, расположенного на позиции защищаемого РЛС;
- защита с помощью САП, расположенного за пределами позиции РЛС.

*Радиоподавление средств РТР путем маскировки излучения защищаемого РЛС предполагает создание активных маскирующих радиопомех (АМП) средствам РТР, ведущим разведку РЛС. Универсальным средством маскировки излучения РЛС являются активные шумовые радиопомехи (ШП). Маскировка излучения РЛС с применением ШП (шумовая маскировка) может создавать для подавляемого средства РТР неопределенность факта присутствия излучения РЛС, а также неопределенность его радиотехнических параметров (несущая частота, сетка рабочих частот, длительность и период повторения импульсов, тип и параметры модуляции, и т.д.) в пределах некоторых зон. Если защищаемое РЛС и САП шумовой маскировки не совмещены в пространстве и не разрешаются подавляемым средством РТР, то создается также неопределенность пространственного положения РЛС для средств РТР. Создаваемая зона неопределенности – сплошная, ее размеры зависят от размеров элемента разрешения средства РТР по пространству.*

С учетом сказанного выше ясно, что шумовая маскировка излучения РЛС позволяет противодействовать реализации средствами РТР всех их основных функций, включающих:

– обнаружение РЛС (обнаружение радиосигналов, излучаемых РЛС, с измерением их радиотехнических параметров (энергетических, временных, спектральных, модуляционных) и выделением последовательности сигналов РЛС на фоне совокупности сигналов других РЭС);

– идентификацию РЛС, его носителя и системы оружия, в составе которой РЛС функционирует;

– местоопределение РЛС (пеленгование, определение координат);

– определение уровня опасности, исходящей от обнаруженного РЛС и формирование целеуказаний по радиотехническим параметрам и координатам для средств радиоэлектронного и огневого поражения.

Таким образом, шумовая маскировка является универсальным средством противодействия средствам РТР в интересах защиты РЛС.

Результат, достигаемый при реализации шумовой маскировки рабочего излучения РЛС – увеличение времени, требуемого на разведку РЛС, уменьшение размеров пространственных зон разведки, ухудшение точностных характеристик разведки. Защиту РЛС от средств РТР путем маскировки рабочего излучения РЛС с применением ШП также называют «шумовое прикрытие РЛС».

*Радиоподавление средств РТР путем имитации излучения защищаемого РЛС* предполагает создание объектов типа «Ложное защищаемое РЛС», расположенных на позициях, удаленных от защищаемого РЛС, при этом средство РТР наблюдает истинную и ложные РЛС отдельно, иначе говоря, «разрешает» их. Такие объекты создают для средств РТР противной стороны неопределенность количества РЛС данного типа в зоне разведки и неопределенность координат защищаемого РЛС. Радиоподавление такого типа реализуется с помощью имитаторов защищаемого РЛС, расположенных на удаленных от него позициях. Излучение ложного РЛС в идеальном случае является копией рабочего излучения защищаемого РЛС.

Имитация излучения РЛС, в отличие от маскировки, не является универсальным средством защиты РЛС от средств РТР. Цель имитации – дезинформирование средств РТР относительно количества РЛС данного типа в зоне разведки и координат защищаемого РЛС. Достижимый результат – отвлечение средств РТР и средств поражения РЛС (средств радиоэлектронного подавления, огневого поражения, оружия, наводящегося на излучение РЛС) на «обслуживание» ложных РЛС.

*Радиоподавление средств РТР путем искажения излучения защищаемого РЛС* позволяет создавать неопределенность значений информационных параметров излучения защищаемого РЛС для средств РТР в некоторых окрестностях истинных значений скрываемых параметров. Размеры этих окрестностей соответствуют элементам разрешения подавляемого средства РТР по искажаемым параметрам. Радиоподавление средств РТР реализуется с помощью специальных излучателей (САП), излучение которых перекрывается по искажаемым информационным параметрам (времени, частоте) с излучением защищаемого РЛС. Необходимое условие: излучение САП не должно разрешаться с рабочим излучением защищаемого РЛС по сопутствующим параметрам. В противном случае излучение защищаемого РЛС может быть селектировано подавляемым средством РТР.

Искажение, как и имитация излучения РЛС, в отличие от маскировки этого излучения, не является универсальным средством защиты РЛС от средств РТР. Цель искажения – увеличение ошибок измерения параметров рабочего излучения (пространственных, спектральных, временных) защищаемого РЛС средствами РТР. Достижимый эффект заключается в снижении достоверности идентификации и увеличении ошибок местоопределения РЛС.

*Радиоподавление комбинированного типа* предполагает совместную реализацию маскировки, имитации и искажения излучения защищаемого РЛС.

Примерами могут быть комбинация шумовой маскировки и имитации рабочего излучения защищаемого РЛС, комбинация шумовой маскировки и искажения параметров излучения защищаемого РЛС.

Каждый из описанных выше видов радиоподавления может найти применение при организации защиты РЭС различного назначения от средств РТР. Вместе с тем, следует отметить особую важность маскировки излучения РЛС как универсального средства защиты РЛС.

## **2.2 Активная маскировка излучения защищаемого РЛС**

Маскировка излучения защищаемого РЛС означает создание на входе приемного тракта средства РТР во время-частотной области, где действуют сигналы, излучаемые РЛС, фона, на котором эти сигналы трудноразличимы. Маскировка обеспечивается путем создания активной маскирующей радиопомехи (АМП) средству РТР. На практике в качестве АМП наиболее широко применяются шумовые радиопомехи (ШП) [77]. Изучение возможностей организации защиты РЛС от средств РТР на принципах шумовой маскировки логично рассматривать как первоочередную задачу. При решении этой задачи необходимо прежде всего рассмотреть вопрос о требованиях к характеристикам АМП и об условиях, при выполнении которых средство РТР можно считать подавленным при действии АМП (вопрос о критерии подавления средства РТР).

## **2.2.1 Требования к активной маскирующей радиопомехе и критерии подавления средства РТР**

### **2.2.1.1 Требования к АМП**

*Обобщенное требование к АМП* заключается в создании на входе приемного тракта подавляемого средства РТР качественного маскирующего фона, перекрывающего время-частотную область, где сосредоточены реализации сигналов рабочего излучения защищаемого РЛС. Качество создаваемого фона определяется статистическими, временными, спектральными, энергетическими характеристиками АМП. К таким характеристикам относятся:

- вероятностное распределение мгновенных значений АМП;
- протяженность реализаций АМП во времени;
- ширина и равномерность энергетического спектра АМП;
- форма энергетического спектра АМП;
- уровень спектральной плотности мощности АМП;
- мощность АМП.

*Частные требования к АМП* определяются необходимостью обеспечения требуемых уровней перечисленных характеристик. Такие требования могут формулироваться, например, следующим образом;

- реализации АМП должны перекрывать по времени маскируемые сигналы РЛС;
- энергетический спектр АМП должен перекрывать спектр маскируемых сигналов РЛС;
- неравномерности энергетического спектра («провалы») не должны превышать допустимый уровень;
- форма энергетического спектра АМП должна совпадать с формой амплитудного спектра сигналов защищаемого РЛС.

### 2.2.1.2 Критерии (условия) подавления средства РТР

Условия подавления средства РТР рассмотрим применительно к задаче защиты РЛС от средства РТР путем маскировки рабочего излучения этого РЛС (зондирующего излучения в пределах главного лепестка ДН антенны РЛС или бокового излучения в пределах боковых лепестков ДН антенны РЛС) шумом («шумовое прикрытие РЛС»). Возможны различные сценарии защиты, отличающиеся расположением защищаемого РЛС, САП шумового прикрытия и подавляемого средства РТР.

На рисунке 2.2 поясняется защита наземного РЛС от авиационного средства РТР с помощью САП наземного базирования (вид сверху). Разведка излучения наземного РЛС средством РТР воздушного базирования возможна с направлений как боковых, так и главного лепестка ДН РЛС. Задача шумовой маскировки излучения РЛС решается в угловой зоне, определяемой шириной ДН антенны САП  $\theta_{\text{САП}}$  (по азимуту, углу места). Зона маскировки представляет собой азимутально-угломестно-дальностную зону.

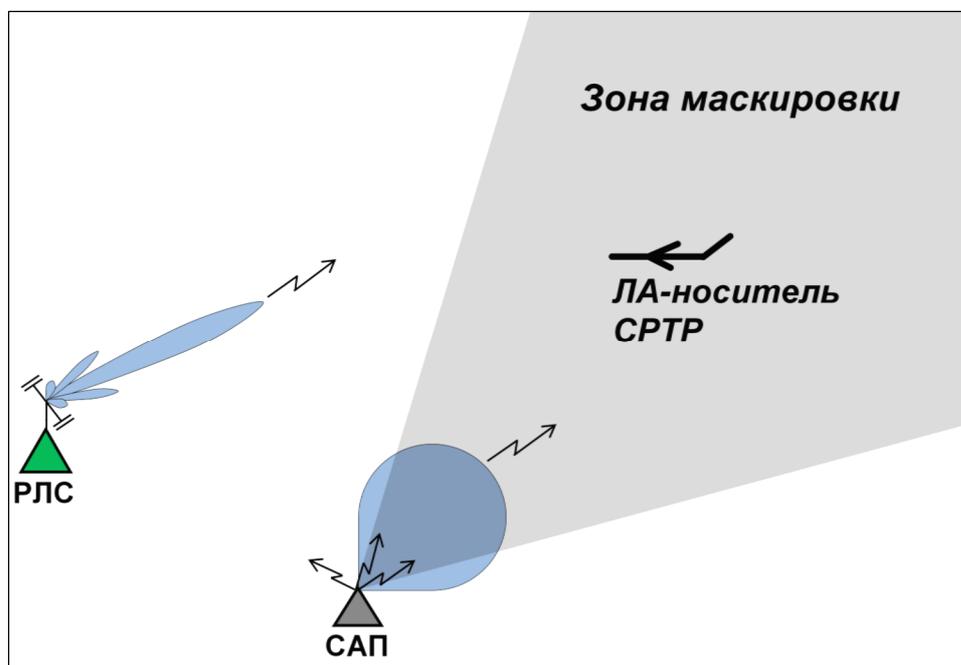


Рисунок 2.2 - Зона маскировки излучения РЛС

Рисунок 2.3 относится к случаю защиты наземного РЛС от средства РТР, расположенного на космической орбите (орбитального СРТР).

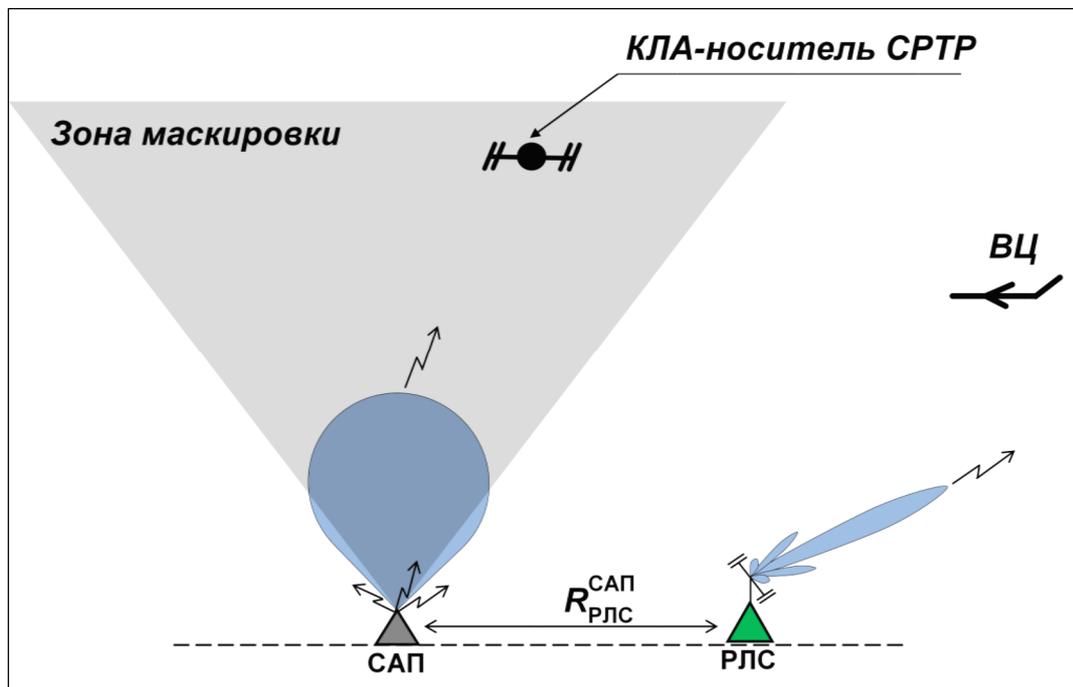


Рисунок 2.3 - Защита наземного РЛС от орбитального СРТР

В данном случае разведка ведется с направлений верхних боковых лепестков ДН антенны РЛС.

*Строгое условие подавления средства РТР радиопомехой маскирующего действия.* Условие, при выполнении которого средство РТР можно считать подавленным (критерий подавления), в виде, стандартном применительно к радиопомехам маскирующего действия (к которым относятся и шумовые помехи), формулируется следующим образом [2, 52, 77]:

$$\frac{P_{\text{ШП вх. СРТР}}}{P_{\text{с. вх. СРТР}}} \geq K_{\text{под}}(\text{ПК}_{\text{треб}}), \quad (2.1)$$

где:  $P_{\text{ШП вх. СРТР}}$  – мощность ШП на входе приемного устройства из состава средства РТР в полосе его пропускания;  $P_{\text{с. вх. СРТР}}$  – мощность сигнала защищаемого РЛС на входе приемного устройства средства РТР;  $K_{\text{под}}(\text{ПК}_{\text{треб}})$  – коэффициент подавления средства РТР;  $\text{ПК}_{\text{треб}}$  – требуемый уровень показателя качества радиоподавления. Коэффициент подавления – это

величина, показывающая, каким должно быть отношение мощности ШП к мощности сигнала защищаемого РЛС на входе приемника подавляемого средства РТР в полосе его пропускания, чтобы обеспечивался требуемый уровень  $PK_{\text{треб}}$  показателя качества шумовой маскировки. Показателем качества маскировки может быть, например, вероятность пропуска сигнала, излученного защищаемым РЛС, автоматическим обнаружителем из состава средства РТР или человеком-оператором средства РТР.

Мощность сигнала на входе приемника СРТР (без учета влияния подстилающей поверхности и атмосферы на распространение радиоволн) определяется соотношением:

$$P_{\text{с. вх. СРТР}} = \frac{P_{\text{РЛС}} G_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}} G_{\text{СРТР}}^{\text{РЛС}} \lambda^2 \gamma_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}}}{(4\pi)^2 (r_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}})^2}, \quad (2.2)$$

где  $P_{\text{РЛС}}$  – импульсная мощность излучения РЛС;  $G_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}}$  – коэффициент усиления антенны РЛС в направлении СРТР;  $G_{\text{СРТР}}^{\text{РЛС}}$  – коэффициент усиления приемной антенны СРТР в направлении РЛС;  $\lambda$  – длина волны излучения РЛС;  $\gamma_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}}$  – коэффициент, учитывающий рассогласование поляризации антенн РЛС и СРТР;  $r_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}}$  – расстояние между РЛС и СРТР. Аналогично мощность ШП на входе приемника СРТР в полосе его пропускания записывается как

$$P_{\text{ШП вх. СРТР}} = \frac{P_{\text{САП}} G_{\text{САП}}^{\text{СРТР}} G_{\text{СРТР}}^{\text{САП}} \lambda^2 \gamma_{\text{САП}}^{\text{СРТР}}}{(4\pi)^2 (r_{\text{САП}}^{\text{СРТР}})^2 K_{\text{ШП}f}}, \quad (2.3)$$

где  $P_{\text{САП}}$  – мощность САП на входе его передающей антенны;  $G_{\text{САП}}^{\text{СРТР}}$  – коэффициент усиления антенны САП в направлении СРТР;  $G_{\text{СРТР}}^{\text{САП}}$  – коэффициент усиления антенны СРТР в направлении САП;  $\gamma_{\text{САП}}^{\text{СРТР}}$  – коэффициент, учитывающий рассогласование поляризации антенн САП и СРТР;  $r_{\text{САП}}^{\text{СРТР}}$  – расстояние между САП и СРТР;  $K_{\text{ШП}f} \geq 1$  – относительная ширина спектра ШП (параметр прицельности ШП по частоте). Параметр прицельности ШП по частоте определяется как

$$K_{\text{ШП}f} = \begin{cases} \frac{\Delta f_{\text{ШП}}}{\Delta f_{\text{СРТР}}}, & \text{если } \frac{\Delta f_{\text{ШП}}}{\Delta f_{\text{СРТР}}} > 1 \\ 1, & \text{если } \frac{\Delta f_{\text{ШП}}}{\Delta f_{\text{СРТР}}} \leq 1 \end{cases},$$

где  $\Delta f_{\text{ШП}}$  – ширина спектра ШП;  $\Delta f_{\text{СРТР}}$  – полоса пропускания приемника СРТР. Подстановка (2.2) и (2.3) в (2.1) дает условие подавления средства РТР в развернутом виде:

$$\frac{P_{\text{ШП вх. СРТР}}}{P_{\text{с. вх. СРТР}}} = \frac{P_{\text{САП}} G_{\text{САП}}^{\text{СРТР}} G_{\text{СРТР}}^{\text{САП}} \gamma_{\text{САП}}^{\text{СРТР}} (r_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}})^2}{P_{\text{РЛС}} G_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}} G_{\text{СРТР}}^{\text{РЛС}} \gamma_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}} (r_{\text{САП}}^{\text{СРТР}})^2 K_{\text{ШП}f}} \geq K_{\text{под}} (\text{ПК}_{\text{треб}}). \quad (2.4)$$

Соотношение (2.4) является основой при рассмотрении характеристик радиоподавления средства РТР. С учетом ограничений на его применимость (не учитывается влияние подстилающей поверхности и атмосферы на распространение радиоволн), это соотношение может быть использовано, если известны все фигурирующие в (2.4) величины.

*Упрощенное условие подавления средства РТР радиопомехой маскирующего действия.* Для практики характерны ситуации, когда на стороне защищаемого РЛС какие-либо сведения относительно средств РТР противной стороны отсутствуют, либо имеются лишь ограниченные сведения. Например, в условиях действия малозаметных ЛА – носителей средств РТР типичны ситуации, когда подлежащее защите РЛС не имеет сведений о факте присутствия и координаты средств РТР противной стороны в анализируемой пространственной зоне. Также может быть неизвестен факт отсутствия углового разрешения защищаемого РЛС и САП шумового прикрытия.

В указанных условиях организация шумовой маскировки излучения РЛС в требуемой зоне на базе методики, основанной на применении общего условия подавления (2.4), невозможна, так как применение этого условия требует знания расстояний  $r_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}}$ ,  $r_{\text{САП}}^{\text{СРТР}}$ , усиления антенн  $G_{\text{СРТР}}^{\text{РЛС}}$ ,  $G_{\text{СРТР}}^{\text{САП}}$ ,  $G_{\text{САП}}^{\text{СРТР}}$ , а также параметров  $\gamma_{\text{САП}}^{\text{СРТР}}$ ,  $\gamma_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}}$ , характеризующих рассогласование поляризации соответствующих антенн.

Преодоление обсуждаемых трудностей, возникающих при организации шумового прикрытия защищаемого РЛС в условиях отсутствия сведений о средствах РТР противной стороны, возможно путем перехода к использованию упрощенного условия подавления средства РТР, имеющего вид:

$$\frac{\text{ППМ}_{\text{САП}}^{\text{А}}}{\text{ППМ}_{\text{РЛС}}^{\text{А}}} \geq K_{\text{под}}(\text{ПК}_{\text{треб}}), \quad (2.5)$$

где  $\text{ППМ}_{\text{САП}}^{\text{А}}$  и  $\text{ППМ}_{\text{РЛС}}^{\text{А}}$  – плотности потока мощности излучения соответственно САП и РЛС в произвольной рассматриваемой точке А;  $K_{\text{под}}(\text{ПК}_{\text{треб}})$  – коэффициент подавления, зависящий от показателя качества радиоподавления  $\text{ПК}_{\text{треб}}$ , аналогичный таковому в общем условии подавления (2.4). С учетом того, что

$$\text{ППМ}_{\text{САП}}^{\text{А}} = \frac{P_{\text{САП}} G_{\text{САП}}^{\text{А}}}{4\pi(r_{\text{САП}}^{\text{А}})^2},$$

$$\text{ППМ}_{\text{РЛС}}^{\text{А}} = \frac{P_{\text{РЛС}} G_{\text{РЛС}}^{\text{А}}}{4\pi(r_{\text{РЛС}}^{\text{А}})^2},$$

получим упрощенное условие подавления средства РТР (2.5) в развернутом виде:

$$\frac{P_{\text{САП}} G_{\text{САП}}^{\text{А}} (r_{\text{РЛС}}^{\text{А}})^2}{P_{\text{РЛС}} G_{\text{РЛС}}^{\text{А}} (r_{\text{САП}}^{\text{А}})^2} \geq K_{\text{под}}(\text{ПК}_{\text{треб}}), \quad (2.6)$$

Условие подавления средства РТР вида (2.6) требует, чтобы плотность потока мощности шумового излучения САП в рассматриваемой точке А не менее, чем в  $K_{\text{под}}(\text{ПК}_{\text{треб}})$  раз превышала плотность потока мощности излучения РЛС в этой точке. Нетрудно видеть, что упрощенное условие подавления (2.6) вытекает из общего условия (2.4) при выполнении равенств:

$$G_{\text{СРТР}}^{\text{САП}} = G_{\text{СРТР}}^{\text{РЛС}}, \quad (2.7)$$

$$\gamma_{\text{САП}}^{\text{СРТР}} = \gamma_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}}, \quad (2.8)$$

$$K_{\text{ШП}f} = 1,$$

а также при расположении средства РТР в рассматриваемой точке А.

Равенство (2.7) выполняется точно, когда антенна средства РТР – изотропная. Приближенное выполнение этого равенства имеет место, если отсутствует угловое разрешение защищаемого РЛС и САП шумового прикрытия пеленгатором из состава средства РТР. Равенство (2.8) выполняется точно, если антенны защищаемого РЛС и САП шумового прикрытия имеют одинаковую поляризацию. Равенство  $K_{ШП f} = 1$  обычно выполняется, так как ширина спектра ШП, совпадающая, как правило, с шириной спектра излучения защищаемого РЛС, всегда меньше полосы пропускания средства РТР.

Преимущество упрощенного критерия, подавления средства РТР вида (2.6) состоит в том, что для его использования применительно к произвольной точке рабочей зоны защищаемого РЛС не требуется знания факта присутствия подавляемого средства РТР в этой точке. Также не требуется знание факта присутствия средства РТР в зоне функционирования РЛС. Кроме того, не требуется знание усиления антенны средства РТР в направлениях РЛС и САП и поляризации антенн. Для корректного применения упрощенного критерия (2.6) требуется только отсутствие углового разрешения защищаемого РЛС и САП шумового прикрытия из рассматриваемой точки А пеленгатором средства РТР.

Упрощенный критерий подавления СРТР (2.6), исходя из его сущности, логично называть условием маскировки излучения РЛС в рассматриваемой точке А. Он может быть применен к любой точке рассматриваемой пространственной зоны. Совокупность точек, в которых упрощенный критерий выполняется, образует зону, в пределах которой излучение РЛС замаскировано шумом. Эту зону будем называть зоной маскировки излучения РЛС (ЗМИ РЛС). Выводы, которые могут быть сделаны на основе упрощенного критерия (2.6), совпадут с выводами, сделанными на основе общего критерия (2.4), если отсутствует угловое разрешение защищаемого

РЛС и САП шумового прикрытия пеленгатором СРТР из всех рассматриваемых точек.

Таким образом, для корректного использования упрощенного критерия подавления средства РТР применительно к любой рассматриваемой точке необходимо обеспечивать тем или иным способом отсутствие углового разрешения защищаемого РЛС и САП шумового прикрытия из этой точки пеленгатором средства РТР.

### 2.2.2 Мощность САП шумового прикрытия РЛС, требуемая для подавления средства РТР

Соотношение для мощности САП, требуемой для маскировки излучения РЛС на входе приемника средства РТР, следует непосредственно из (2.4) и имеет вид:

$$P_{\text{САП треб}} \geq \frac{P_{\text{РЛС}} G_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}} G_{\text{СРТР}}^{\text{РЛС}} \gamma_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}} (r_{\text{САП}}^{\text{СРТР}})^2 K_{\text{ШПф}} K_{\text{под}} (\text{ПК}_{\text{треб}})}{G_{\text{САП}}^{\text{СРТР}} G_{\text{СРТР}}^{\text{САП}} \gamma_{\text{САП}}^{\text{СРТР}} (r_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}})^2}, \quad (2.9)$$

Фигурирующие в (2.9) величины определяются следующим образом:

$G_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}} = G_{\text{РЛС}}^{\text{max}} \nu_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}}$  – усиление антенны защищаемого РЛС в направлении СРТР;

$G_{\text{СРТР}}^{\text{РЛС}} = G_{\text{СРТР}}^{\text{max}} \nu_{\text{СРТР}}^{\text{РЛС}}$  – усиление антенны СРТР в направлении разведываемого РЛС;

$G_{\text{САП}}^{\text{СРТР}} = G_{\text{САП}}^{\text{max}} \nu_{\text{САП}}^{\text{СРТР}}$  – усиление антенны САП в направлении СРТР;

$G_{\text{СРТР}}^{\text{САП}} = G_{\text{СРТР}}^{\text{max}} \nu_{\text{СРТР}}^{\text{САП}}$  – усиление антенны СРТР в направлении САП;  $G_{\text{РЛС}}^{\text{max}}, G_{\text{СРТР}}^{\text{max}}$ ,

$G_{\text{САП}}^{\text{max}}$  – усиление антенн РЛС, СРТР и САП в направлениях максимумов ДН их

антенн;  $\nu_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}}, \nu_{\text{СРТР}}^{\text{РЛС}}, \nu_{\text{СРТР}}^{\text{САП}}, \nu_{\text{САП}}^{\text{СРТР}}$  – значения нормированных ДН РЛС, СРТР и

САП в соответствующих направлениях.

Если ориентироваться на упрощенный критерий подавления СРТР (2.6), предназначенный для использования применительно к произвольной точке А, то мощность САП, требуемая для маскировки излучения РЛС в этой точке, определяется соотношением:

$$P_{\text{САП треб}}^{(A)} \geq \frac{P_{\text{РЛС}} G_{\text{РЛС}}^A (r_{\text{САП}}^A)^2 K_{\text{ШПФ}} K_{\text{под}} (\text{ПК}_{\text{треб}})}{G_{\text{САП}}^A (r_{\text{РЛС}}^A)^2}, \quad (2.10)$$

вытекающим из (9) при выполнении равенств (7) и (8).

Рассмотрим примеры определения требуемой мощности САП шумового прикрития применительно к РЛС некоторых типов.

В работе рассматриваются РЛС обнаружения ВЦ малой и средней дальности действия с типовыми характеристиками, приведенными в таблице 2.1 согласно [35, 56, 85].

Таблица 2.1 - Характеристики РЛС обнаружения ВЦ малой и средней дальности действия

Параметр РЛС	РЛС малой дальности	РЛС средней дальности
Импульсная мощность, кВт	60	200
Длина волны, см	4	7
Коэффициент усиления антенны в максимуме ДН, дБ	40	40
Уровень боковых лепестков ДН антенны, дБ		
ближних	-22	-22
дальних	-50	-50
Ширина ДН антенны, град		
по азимуту	1	2
по углу места	3	1,5
Сектор обзора, град		
по азимуту	360	360
по углу места	60	60
Сканирование главным лепестком ДН		
по азимуту	механическое	механическое
по углу места	электронное	электронное
Индикаторная дальность, км	30	250
Тип сигнала	Импульсный	Импульсный, ЛЧМ

**Пример 1.** Шумовая маскировка излучения РЛС обнаружения ВЦ малой дальности действия (индикаторная дальность 30 км). Пусть сценарий шумового прикрития РЛС характеризуется следующими параметрами: мощность излучения РЛС в импульсе  $P_{\text{РЛС}} = 60$  кВт; усиление антенны РЛС в направлении максимума ДН  $G_{\text{РЛС}}^{\text{max}} = 40$  дБ; усиление антенны САП в

направлении СРТР  $G_{САП}^{СРТР} = 10$  дБ;  $G_{СРТР}^{РЛС} = G_{СРТР}^{САП} = 10$  дБ (отсутствует угловое разрешение РЛС и САП);  $\gamma_{САП}^{СРТР} = \gamma_{РЛС}^{СРТР} = 0,5$ ;  $K_{ШПf} = 1$  (ширина спектра шума, маскирующего излучение РЛС, не превышает ширину полосы пропускания приемника СРТР);  $K_{под}(ПК_{треб}) = 1$  (СРТР считается подавленным, если мощность сигнала разведываемого РЛС на входе приемного устройства СРТР не превышает мощность шума, маскирующего этот сигнал). Результаты расчетов величины  $P_{САП\text{ треб}}$ , выполненных согласно (10), представлены на рисунке 2.4 в виде семейства графиков зависимости  $P_{САП\text{ треб}}(v_{РЛС}^{СРТР})$  при расстоянии между РЛС и СРТР  $r_{РЛС}^{СРТР} = 300$  км и  $r_{САП}^{СРТР}$  в диапазоне до 300 км.

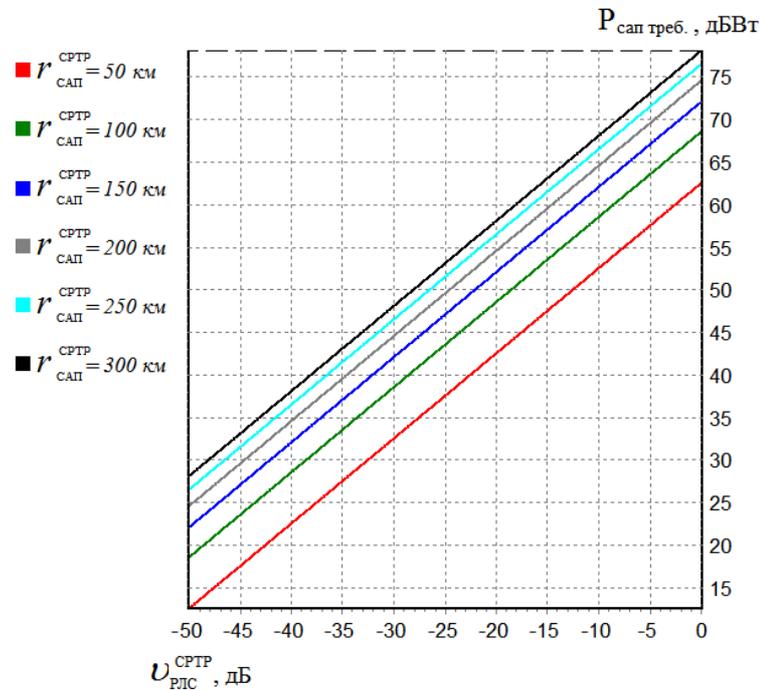


Рисунок 2.4 - Мощность САП, требуемая для маскировки излучения

РЛС малой дальности при  $r_{РЛС}^{СРТР} = 300$  км

**Пример 2.** Шумовая маскировка излучения РЛС обнаружения ВЦ средней дальности действия (индикаторная дальность 250 км). Параметры сценария шумового прикрытия РЛС:  $P_{РЛС} = 200$  кВт;  $G_{РЛС}^{max} = 40$  дБ;  $G_{САП}^{СРТР} = 10$  дБ;  $G_{СРТР}^{РЛС} = G_{СРТР}^{САП} = 10$  дБ;  $\gamma_{САП}^{СРТР} = \gamma_{РЛС}^{СРТР} = 0,5$ ;  $K_{ШПf} = 1$ ;  $K_{под}(ПК_{треб}) = 1$ .

Следует отметить, что значение  $K_{\text{под}}(\text{ПК}_{\text{треб}}) = 1$  фактически обеспечивает необнаружение сигналов защищаемого РЛС на фоне шума как автоматическим обнаружителем, так и человеком – оператором средства РТР.

Результаты расчетов зависимости  $P_{\text{САП}_{\text{треб}}}(\nu_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}})$  представлены на рисунке 2.5 в виде семейства графиков при расстоянии между РЛС и СРТР  $r_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}} = 300$  км, и расстоянии  $r_{\text{САП}}^{\text{СРТР}}$  в диапазоне до 300 км.

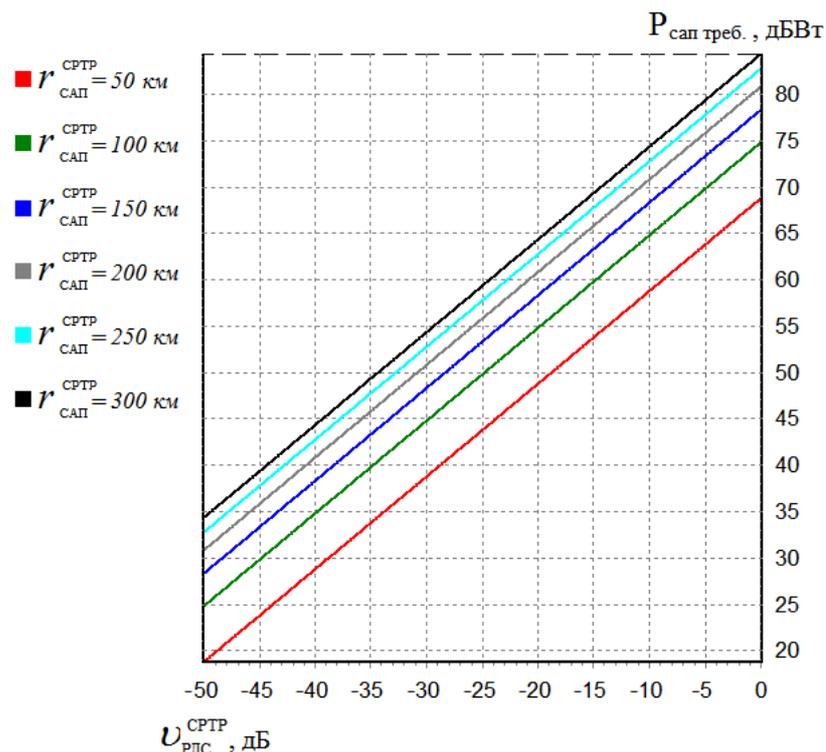


Рисунок 2.5 - Мощность САП, требуемая для маскировки излучения РЛС средней дальности при  $r_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}} = 300$  км

Рассмотрение представленных выше результатов расчетов позволяет выявить следующее.

1. Результаты расчетов, представленные в виде графиков на рисунках 2.4 и 2.5, выполненных применительно к РЛС малой и средней дальности (индикаторные дальности соответственно 30 км и 250 км), указывают на очень высокие требования к энергетике САП шумового прикрытия РЛС. В ряде случаев требуемые уровни мощности САП представляются практически нереализуемыми.

Сказанное относится, прежде всего, к маскировке *зондирующего излучения* защищаемого РЛС (излучения РЛС в пределах ГЛ ДН антенны). При расположении САП шумового прикрытия РЛС в непосредственной близости от защищаемого РЛС (например, на платформе РЛС или в пределах позиции РЛС) и при расстояниях между средством РТР и РЛС не более 300 км мощности САП, требуемые для маскировки зондирующего излучения РЛС, превышают 75 дБВт (РЛС малой дальности) и 80 дБВт (РЛС средней дальности).

Также нереализуемо высокими следует признать уровни мощности САП шумового прикрытия РЛС, требуемые для маскировки *бокового излучения* РЛС в пределах нескольких первых (ближних) боковых лепестков ДН антенны. Так, для маскировки излучения РЛС в пределах БЛ, уровень которых превышает  $-30$  дБ по отношению к ГЛ, при расстоянии между защищаемым РЛС и подавляемым средством РТР 300 км и при расположении САП шумового прикрытия РЛС на платформе или в пределах позиции РЛС, уровни требуемой мощности САП достигают 48 дБВт (защита РЛС малой дальности) и 54 дБВт (защита РЛС средней дальности).

2. Для обоснования уровней мощности САП шумового прикрытия РЛС, которые можно считать реализуемыми, были использованы данные, содержащиеся в [7, 19], где сообщается о применении в пределах позиции защищаемого РЛС нескольких излучателей с импульсной мощностью 15 кВт каждый (средняя мощность 450 Вт).

Ориентируясь на указанный уровень, а также на результаты расчетов, отраженные на рисунках 2.4 и 2.5, можно заключить, что шумовая маскировка бокового излучения РЛС малой дальности при размещении САП на позиции РЛС реализуема вплоть до рубежа  $r_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}} = 300$  км в пределах угловых секторов, где уровни БЛ ДН антенны РЛС не превышают приблизительно  $-37$  дБ по отношению к ГЛ. Применительно к РЛС средней дальности, как следует из рассмотрения рисунка 2.5, аналогичное значение составляет  $-43$  дБ.

### **2.2.3 Зональные показатели эффективности радиоподавления средства РТР методом шумовой маскировки излучения защищаемого РЛС**

#### **2.2.3.1 Сущность зональных показателей**

При решении задач защиты РЛС путем шумовой маскировки его излучения представляет интерес определение показателей эффективности радиоподавления средств РТР, позволяющих судить о размерах и конфигурации пространственных зон, в пределах которых выполняются условия подавления средств РТР. Такими показателями могут быть так называемые «зональные показатели»: «зона подавления средства РТР (ЗП СРТР)», «зона маскировки излучения РЛС (ЗМИ РЛС)» и «зона действия САП (ЗД САП)» при защите РЛС.

Зональный показатель ЗП СРТР - это пространственная зона, в каждой точке которой, если в ней поместить подавляемое средство РТР, выполняется критерий подавления (2.4) или (2.6). Показатель ЗМИ РЛС это пространственная зона, в каждой точке которой выполняется упрощенный критерий подавления (2.6). Показатель ЗД САП - это пространственная зона, в пределах которой следует размещать САП, чтобы выполнялось условие подавления (2.4) или (2.6).

Использование зонального показателя в виде ЗП СРТР имеет смысл, когда положение одиночного САП шумового прикрытия относительно защищаемого РЛС фиксировано и определяется зона, при размещении в пределах которой подавляемое средство РТР не сможет решать задачи разведки РЛС. Этот показатель может быть использован также при организации коллективного прикрытия РЛС совокупностью САП. Речь идет об определении такой расстановки совокупности САП шумового прикрытия РЛС на местности, при которой обеспечивается подавление средства РТР,

присутствующих в требуемой зоне, представляющей интерес с точки зрения организации защиты РЛС.

Зональный показатель ЗМИ РЛС является упрощенным вариантом показателя ЗП СРТР. Его использование вместо показателя ЗП СРТР корректно, когда обеспечивается отсутствие углового разрешения защищаемого РЛС и САП шумового прикрития из рассматриваемой точки пеленгатором из состава средства РТР.

Использование зонального показателя ЗД САП имеет смысл, когда положение средства РТР относительно защищаемого РЛС известно, и требуется определить (выбрать) позицию САП, при которой обеспечивается выполнение условий подавления средства РТР. Такая ситуация имеет место, например, когда координаты носителя подавляемого средства РТР определяются на стороне защищаемого РЛС средствами активной радиолокации (средствами защищаемого РЛС). Другая подобная ситуация реализуется при защите РЛС от средства РТР космического (орбитального) базирования, когда положение орбитального носителя средства РТР известно на текущем отрезке времени.

Определение зональных показателей ЗП СРТР, ЗМИ РЛС и ЗД САП возможно методами полигонного эксперимента, а также аналитико-расчетными методами.

При полигонных экспериментах по оценке ЗП СРТР защищаемое РЛС и САП шумового прикрития РЛС размещаются на местности на фиксированных позициях и включаются на излучение. В каждую точку пространственной зоны, рассматриваемой на предмет определения ЗП СРТР, помещается средство РТР (как правило, это аналог соответствующих средств, имеющих на противной стороне). Затем средство РТР решает задачи обнаружения излучения РЛС в анализируемой точке и измерения его параметров. Таким образом перебираются представляющие интерес точки, назначаемые на

местности с определенным шагом по координатам. Точки, где излучение РЛС не обнаруживается, считаются принадлежащими ЗП СРТР.

Определение показателя ЗМИ РЛС, в отличие от показателя ЗП СРТР, не требует использования средства РТР. Достаточно наличия измерителя плотности потока мощности излучения. Это существенно упрощает выполнение измерений.

При определении ЗД САП отличия состоят в том, что на местности фиксируется положение РЛС и средства РТР, а САП прикрития РЛС размещается последовательно в точках рассматриваемой зоны. Результаты работы средства РТР фиксируются для каждой из этих точек.

При использовании аналитико-расчетных методов зональные показатели в виде ЗП СРТР, ЗМИ РЛС и ЗД САП оцениваются путем математических расчетов, выполняемых на базе соотношения (2.4) или (2.6) применительно к точкам рассматриваемой пространственной зоны. Иначе говоря, средство РТР (при оценке ЗП СРТР), измеритель плотности потока мощности излучения (при оценке ЗМИ РЛС) или САП (при оценке ЗД САП) с заданными характеристиками виртуально помещается в точки анализируемой зоны, и для каждой из этих точек расчетным путем проверяется выполнение критерия подавления средства РТР (2.4) или его упрощенного варианта (2.6). Конфигурация зон «ЗП СРТР», «ЗМИ РЛС» и «ЗД САП» определяется соотношением величин, присутствующих в (2.4), (2.6).

Следует отметить, что с практической точки зрения наибольший интерес представляет зональный показатель «ЗМИ РЛС». Преимущество его использования при организации защиты РЛС от средства РТР состоит в том, что на стороне защищаемого РЛС не требуется наличия какой-либо информации о средстве РТР, в том числе о факте присутствия средства РТР в представляющей интерес пространственной зоне.

Для экономии затрат времени и средств при получении оценок конфигурации ЗП СРТР, ЗМИ РЛС и ЗД САП при защите РЛС расчетно-

аналитическим методом применительно к различным сценариям защиты РЛС подходят методы компьютерного имитационного моделирования. Ниже описано применение этих методов к рассматриваемым задачам.

### **2.2.3.2 Оценка зональных показателей эффективности радиоподавления средств РТР с применением компьютерных имитационных моделей**

В качестве инструментов для определения ЗП СРТР, ЗМИ РЛС и ЗД САП в данном случае используются компьютерные имитационные модели. Такие модели были разработаны в рамках данной работы. Они содержат программные средства для расчета ДН антенн защищаемого РЛС, средства РТР и САП шумового прикрития РЛС. Каждое из этих средств позволяет рассчитать ДН соответствующих антенн по задаваемым исходным данным. Исходными данными являются конфигурация, размеры и другие необходимые параметры антенной решетки, используемой в качестве модели антенны РЛС, средства РТР или САП. Кроме того, имеются средства для задания координат РЛС, САП и средства РТР на местности, для выполнения расчетов по определению ЗП СРТР, ЗМИ РЛС и ЗД САП, графического отображения результатов расчетов и другие средства.

Ниже представлены примеры расчетов зональных показателей эффективности радиоподавления средства РТР в интересах защиты РЛС, выполненных с использованием разработанных компьютерных имитационных моделей, применительно к защите РЛС обнаружения ВЦ малой и средней дальности. Учитывая ограничения по объему материалов диссертации, а также тот факт, что в практике радиоподавления средств РТР при отсутствии сведений о СРТР наибольший интерес представляет зональный показатель «Зона маскировки излучения РЛС» (ЗМИ РЛС), далее внимание уделяется расчетам именно этого показателя.

**Пример 1.** Расчет зонального показателя ЗМИ РЛС применительно к защите РЛС обнаружения ВЦ малой дальности действия (индикаторная дальность 32 км). Исходные данные для расчетов: мощность зондирующего излучения РЛС в импульсе  $P_{\text{РЛС}} = 60$  кВт; усиление антенны РЛС в направлении максимума ДН  $G_{\text{РЛС}}^{\text{max}} = 40$  дБ; усиление антенн САП в направлении максимумов ДН  $G_{\text{САП}}^{\text{max}} = 10$  дБ параметр прицельности ШП по частоте  $K_{\text{ШП}f} = 1$ ; коэффициент подавления  $K_{\text{под}}(\text{ПК}_{\text{треб}}) = 1$ .

Результаты расчетов в виде графических изображений соответствующих зон представлены ниже на рисунках. Зоны построены для азимутальной плоскости, в которой расположены РЛС, средство РТР и САП, максимумы ДН, которых лежат в обсуждаемой плоскости. При построении зон не учитывалось влияние подстилающей поверхности, затухания электромагнитных волн в атмосфере, кривизны земной поверхности. Рисунки 2.6 - 2.9 относятся к случаю, когда антенны двух САП (САП<sub>1</sub> и САП<sub>2</sub>) расположены на платформе РЛС с механическим сканированием по азимуту (антенные системы данного типа в настоящий момент наиболее широко применяется в обзорных РЛС зенитных ракетных комплексов [22]). Предполагается, что антенны САП жестко связаны с антенной РЛС, сканирование по азимуту совместное. Диаграмма направленности антенны каждого САП перекрывает соответствующую зону справа и слева от главного лепестка ДН антенны РЛС. Рисунки соответствуют различным значениям величин  $P_{\text{САП}}$  (мощность САП<sub>1</sub> и САП<sub>2</sub>),  $\theta_{\beta \text{ САП}} = 60^\circ$  (ширина ДН антенн САП<sub>1</sub> и САП<sub>2</sub> по азимуту) и  $\Delta_{\beta \text{ САП}} = 20^\circ$  (разнос ДН антенн САП<sub>1</sub> и САП<sub>2</sub> по азимуту). Координаты РЛС: (0;150) км. Координаты САП: САП<sub>1</sub> - (0;150) км; САП<sub>2</sub> - (0;150) км. Желтым цветом обозначены ДН антенн САП, черным цветом – ДН антенны РЛС. Зона, в пределах которой излучение РЛС замаскировано, обозначена красным цветом. Серым цветом обозначена часть рассматриваемой плоскости, в которой излучение РЛС не замаскировано.

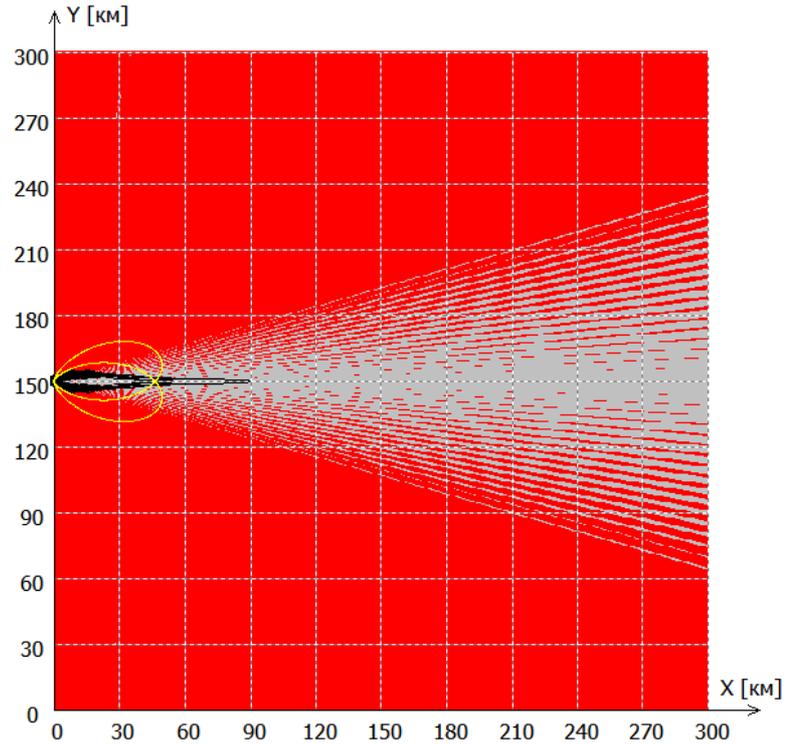


Рисунок 2.6 - ЗМИ РЛС малой дальности, САП<sub>1</sub> и САП<sub>2</sub> расположены на платформе РЛС,  $P_{\text{САП}_1} = P_{\text{САП}_2} = 600$  Вт.

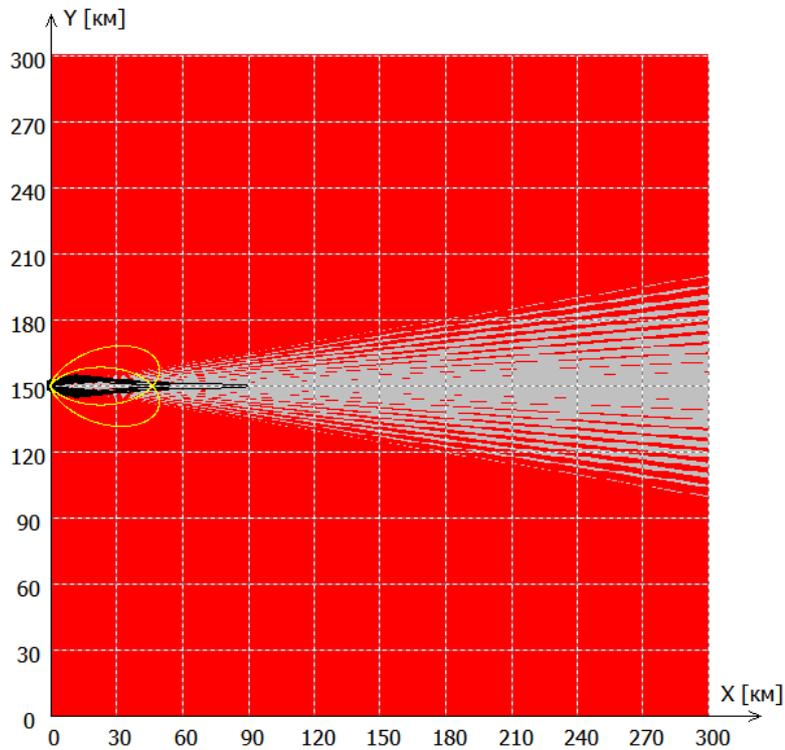


Рисунок 2.7 - ЗМИ РЛС малой дальности, САП<sub>1</sub> и САП<sub>2</sub> расположены на платформе РЛС,  $P_{\text{САП}_1} = P_{\text{САП}_2} = 1000$  Вт.

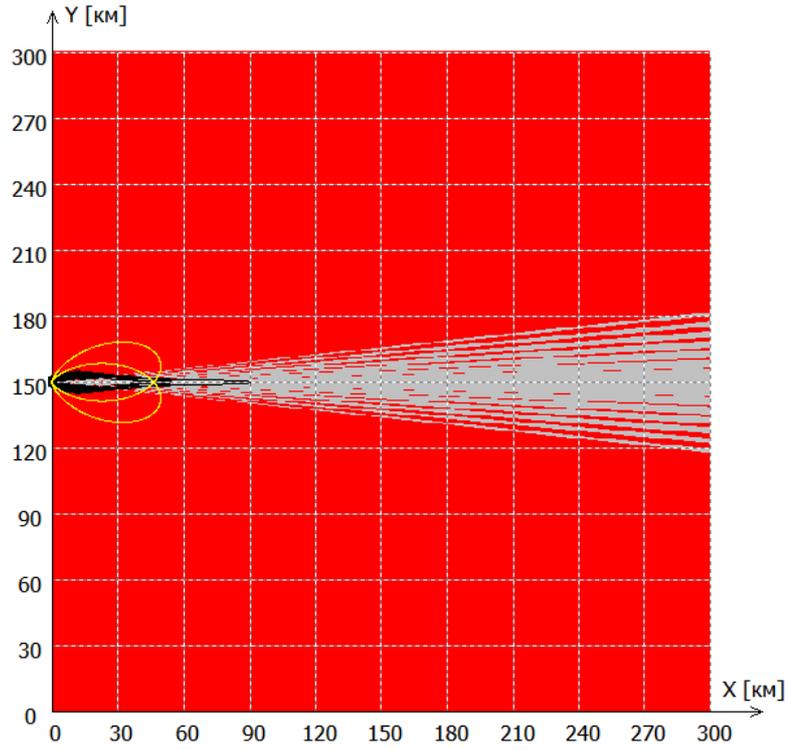


Рисунок 2.8 - ЗМИ РЛС малой дальности, САП<sub>1</sub> и САП<sub>2</sub> расположены на платформе РЛС,  $P_{\text{САП}_1} = P_{\text{САП}_2} = 3000$  Вт.

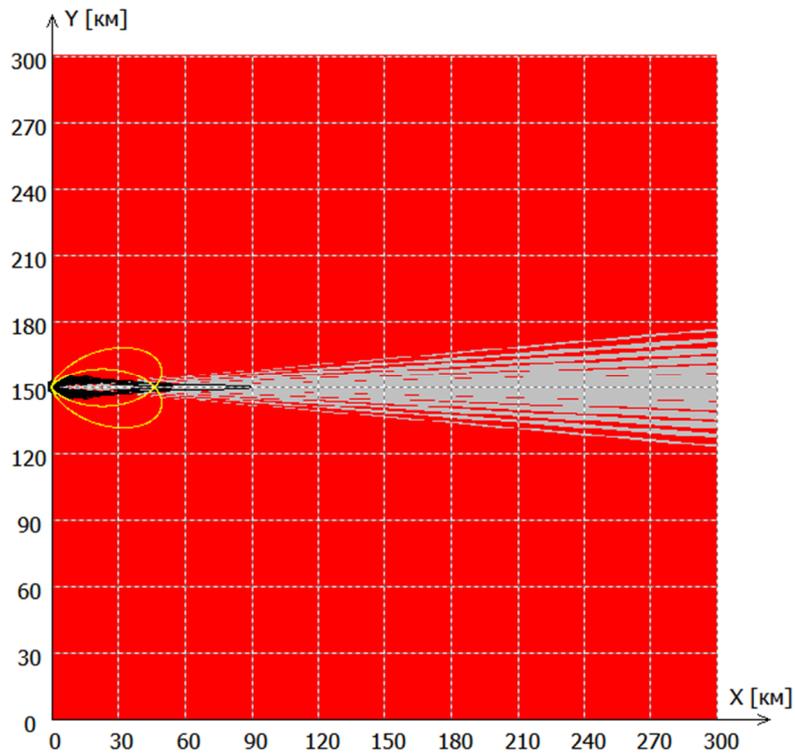


Рисунок 2.9 - ЗМИ РЛС малой дальности, САП<sub>1</sub> и САП<sub>2</sub> расположены на платформе РЛС,  $P_{\text{САП}_1} = P_{\text{САП}_2} = 5000$  Вт.

Рисунки 2.10 - 2.15 относятся к случаю, когда антенны четырех САП (САП<sub>1</sub>, САП<sub>2</sub>, САП<sub>3</sub>, САП<sub>4</sub>) расположены на позиции РЛС. Диаграмма направленности антенны каждого САП перекрывает соответствующую зону шириной 90° по азимуту независимо от процесса сканирования ДН антенны РЛС ( $\theta_{\beta \text{ САП}} = 90^\circ$ ,  $\Delta_{\beta \text{ САП}} = 45^\circ$ ). Рисунки соответствуют различным значениям  $P_{\text{САП}}$  (мощность САП<sub>1</sub>, САП<sub>2</sub>, САП<sub>3</sub>, САП<sub>4</sub>), а также различным значениям угла  $\beta_{\text{ГЛ РЛС}}$  ориентации главного лепестка ДН антенны РЛС по азимуту. Координаты РЛС: (300;300) км. Координаты САП: САП<sub>1</sub> - (301;301) км; САП<sub>2</sub> - (299;301) км; САП<sub>3</sub> - (299; 299) км; САП<sub>4</sub> - (301;299) км. Желтым цветом обозначены ДН антенн САП, черным цветом – ДН антенны РЛС. Зона, в пределах которой излучение РЛС замаскировано, обозначена красным цветом. Серым цветом обозначена часть рассматриваемой плоскости, в которой излучение РЛС не замаскировано.

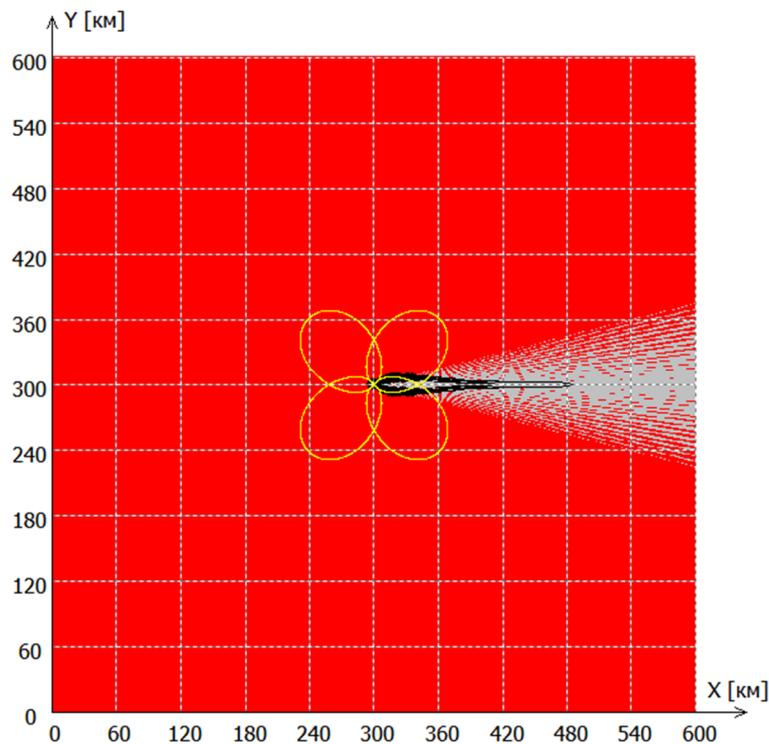


Рисунок 2.10 - ЗМИ РЛС малой дальности, САП<sub>1</sub>, САП<sub>2</sub>, САП<sub>3</sub>, САП<sub>4</sub> расположены на позиции РЛС,  $P_{\text{САП}_1} = P_{\text{САП}_2} = P_{\text{САП}_3} = P_{\text{САП}_4} = 1000 \text{ Вт}$ ,

$$\beta_{\text{ГЛ РЛС}} = 90^\circ.$$

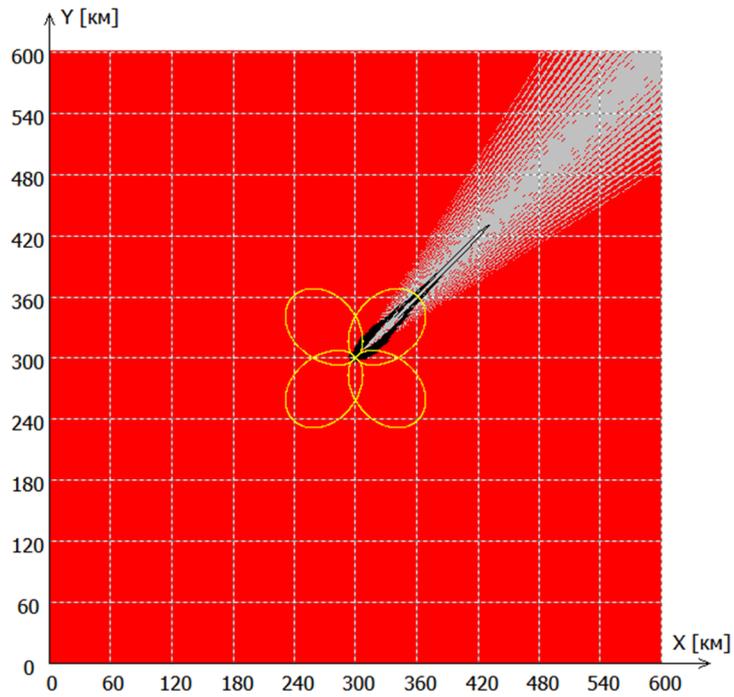


Рисунок 2.11 - ЗМИ РЛС малой дальности, САП<sub>1</sub>, САП<sub>2</sub>, САП<sub>3</sub>, САП<sub>4</sub> расположены на позиции РЛС,  $P_{САП_1} = P_{САП_2} = P_{САП_3} = P_{САП_4} = 1000$  Вт,

$$\beta_{ГЛ\ РЛС} = 45^\circ.$$

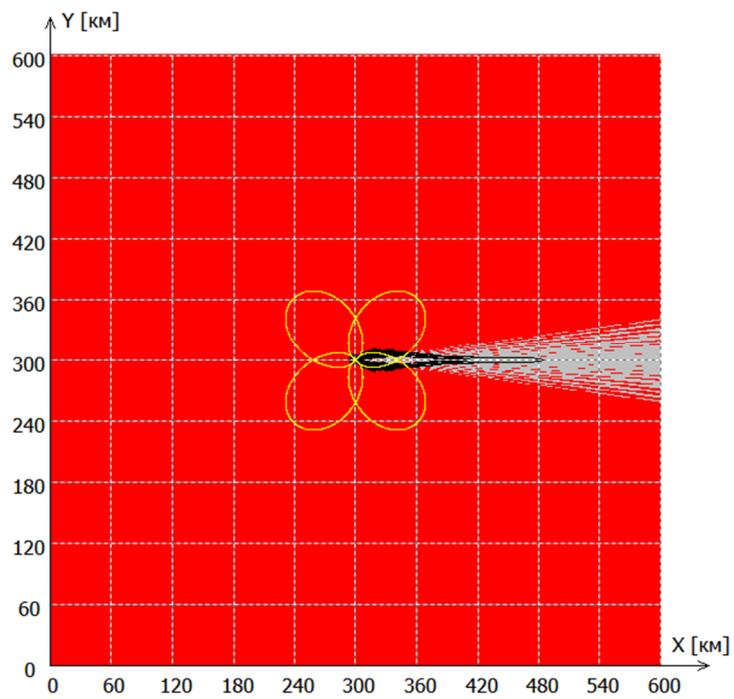


Рисунок 2.12 - ЗМИ РЛС малой дальности, САП<sub>1</sub>, САП<sub>2</sub>, САП<sub>3</sub>, САП<sub>4</sub> расположены на позиции РЛС,  $P_{САП_1} = P_{САП_2} = P_{САП_3} = P_{САП_4} = 3000$  Вт,

$$\beta_{ГЛ\ РЛС} = 90^\circ.$$

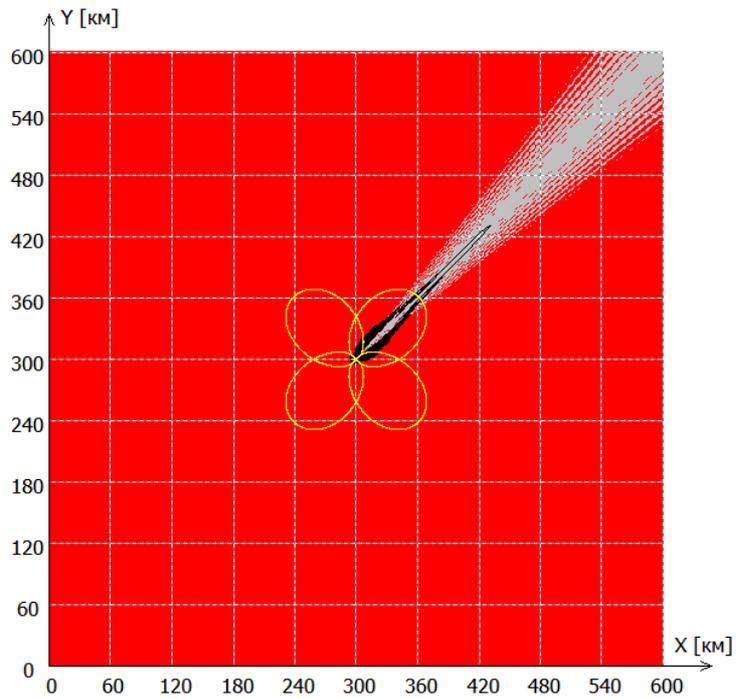


Рисунок 2.13 - ЗМИ РЛС малой дальности, САП<sub>1</sub>, САП<sub>2</sub>, САП<sub>3</sub>, САП<sub>4</sub> расположены на позиции РЛС,  $P_{САП_1} = P_{САП_2} = P_{САП_3} = P_{САП_4} = 3000$  Вт,

$$\beta_{ГЛ РЛС} = 45^\circ.$$

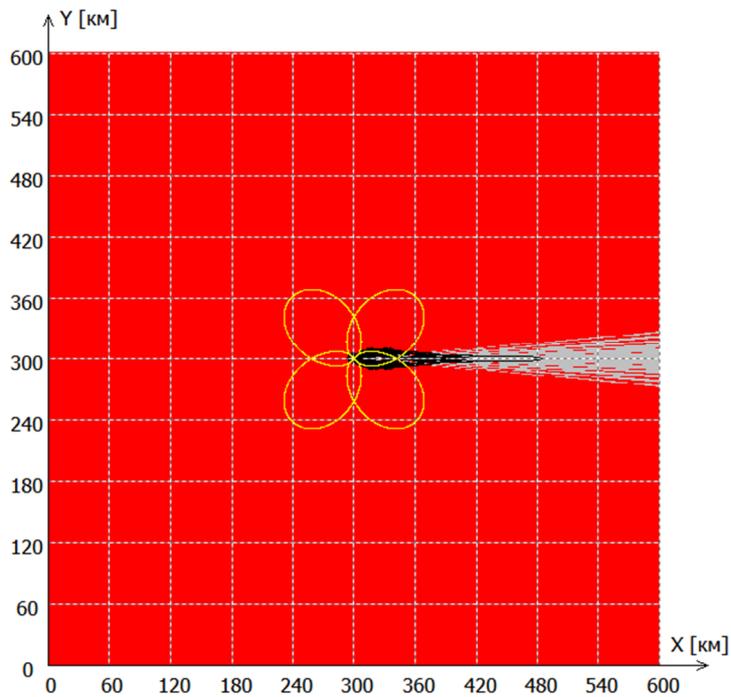


Рисунок 2.14 - ЗМИ РЛС малой дальности, САП<sub>1</sub>, САП<sub>2</sub>, САП<sub>3</sub>, САП<sub>4</sub> расположены на позиции РЛС,  $P_{САП_1} = P_{САП_2} = P_{САП_3} = P_{САП_4} = 7000$  Вт,

$$\beta_{ГЛ РЛС} = 90^\circ.$$

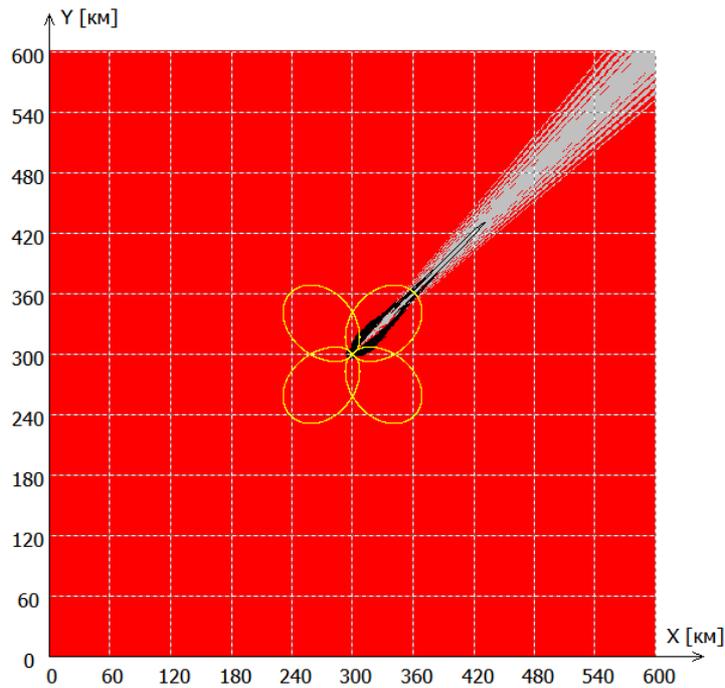


Рисунок 2.15 - ЗМИ РЛС малой дальности, САП<sub>1</sub>, САП<sub>2</sub>, САП<sub>3</sub>, САП<sub>4</sub> расположены на позиции РЛС,  $P_{САП_1} = P_{САП_2} = P_{САП_3} = P_{САП_4} = 7000$  Вт,

$$\beta_{ГЛ\ РЛС} = 45^\circ.$$

**Пример 2.** Расчет зонального показателя ЗМИ РЛС применительно к защите РЛС обнаружения ВЦ средней дальности действия (индикаторная дальность 250 км). Исходные данные для расчетов:  $P_{РЛС} = 200$  кВт;  $G_{РЛС}^{max} = 40$  дБ;  $G_{САП}^{max} = 10$  дБ;  $K_{ШП_f} = 1$ ;  $K_{под}(ПК_{треб}) = 1$ .

Рисунки 2.16 - 2.18, относятся к случаю, когда антенны двух САП (САП<sub>1</sub> и САП<sub>2</sub>) расположены на платформе РЛС с механическим сканированием по азимуту. Предполагается, что антенны САП жестко связаны с антенной РЛС, сканирование по азимуту совместное. Диаграмма направленности антенны каждого САП перекрывает соответствующую зону справа и слева от главного лепестка ДН антенны РЛС. Рисунки соответствуют различным значениям величин  $P_{САП}$  (мощность САП<sub>1</sub> и САП<sub>2</sub>),  $\theta_{\beta\ САП} = 60^\circ$  (ширина ДН антенн САП<sub>1</sub> и САП<sub>2</sub> по азимуту) и  $\Delta_{\beta\ САП} = 40^\circ$  (разнос ДН антенн САП<sub>1</sub> и САП<sub>2</sub> по азимуту). Координаты РЛС: (0;150) км. Координаты САП: САП<sub>1</sub> - (0;150) км; САП<sub>2</sub> - (0;150) км. Желтым цветом обозначены ДН антенн САП, черным цветом – ДН

антенны РЛС. Зона, в пределах которой излучение РЛС замаскировано, обозначена красным цветом. Серым цветом обозначена часть рассматриваемой плоскости, в которой излучение РЛС не замаскировано.

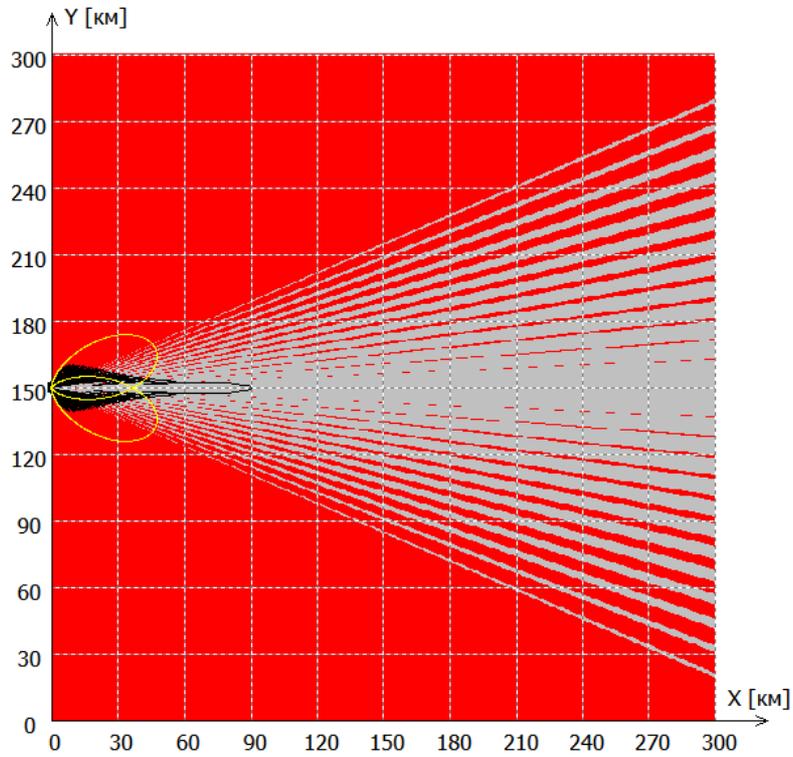


Рисунок 2.16 - ЗМИ РЛС средней дальности, САП<sub>1</sub> и САП<sub>2</sub> расположены на платформе РЛС,  $P_{\text{САП}_1} = P_{\text{САП}_2} = 6000$  Вт.

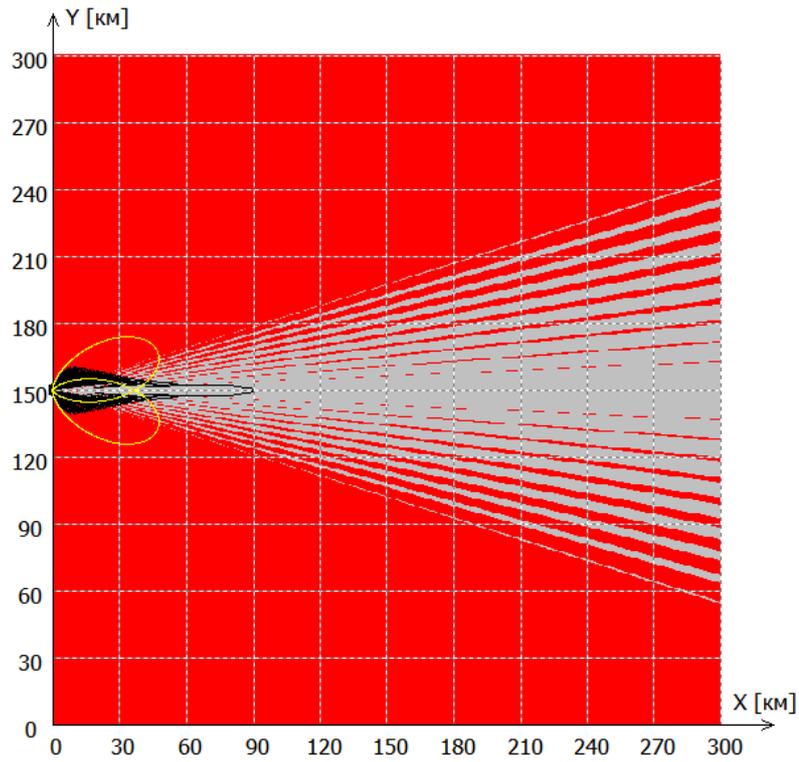


Рисунок 2.17 - ЗМИ РЛС средней дальности, САП<sub>1</sub> и САП<sub>2</sub> расположены на платформе РЛС,  $P_{САП1} = P_{САП2} = 10000$  Вт.

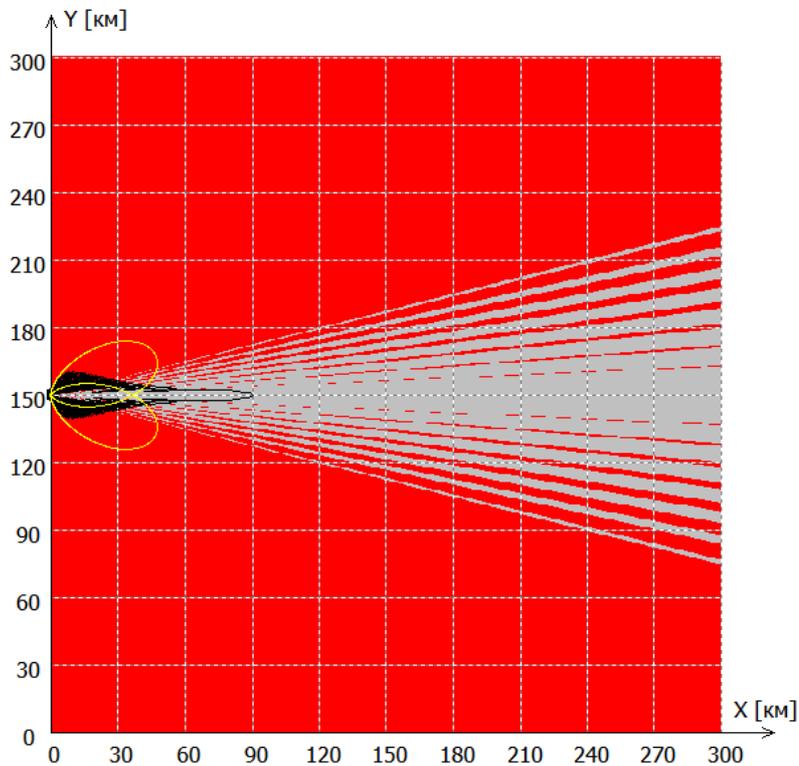


Рисунок 2.18 – ЗМИ РЛС средней дальности, САП<sub>1</sub> и САП<sub>2</sub> расположены на платформе РЛС,  $P_{САП1} = P_{САП2} = 15000$  Вт.

Рисунки 2.19 – 2.24 относятся к случаю, когда антенны четырех САП (САП<sub>1</sub>, САП<sub>2</sub>, САП<sub>3</sub>, САП<sub>4</sub>) расположены на позиции РЛС. Диаграмма направленности антенны каждого САП перекрывает соответствующую зону шириной 90° по азимуту независимо от процесса сканирования ДН антенны РЛС ( $\theta_{\beta \text{ САП}} = 90^\circ$ ,  $\Delta_{\beta \text{ САП}} = 45^\circ$ ). Рисунки соответствуют различным значениям  $P_{\text{САП}}$  (мощность САП<sub>1</sub>, САП<sub>2</sub>, САП<sub>3</sub>, САП<sub>4</sub>), а также различным значениям угла  $\beta_{\text{ГЛ РЛС}}$  ориентации главного лепестка ДН антенны РЛС по азимуту. Координаты РЛС: (300;300) км. Координаты САП: САП<sub>1</sub> - (301;301) км; САП<sub>2</sub> - (299;301) км; САП<sub>3</sub> - (299; 299) км; САП<sub>4</sub> - (301;299) км. Желтым цветом обозначены ДН антенн САП, черным цветом – ДН антенны РЛС. Зона, в пределах которой излучение РЛС замаскировано, обозначена красным цветом. Серым цветом обозначена часть рассматриваемой плоскости, в которой излучение РЛС не замаскировано.

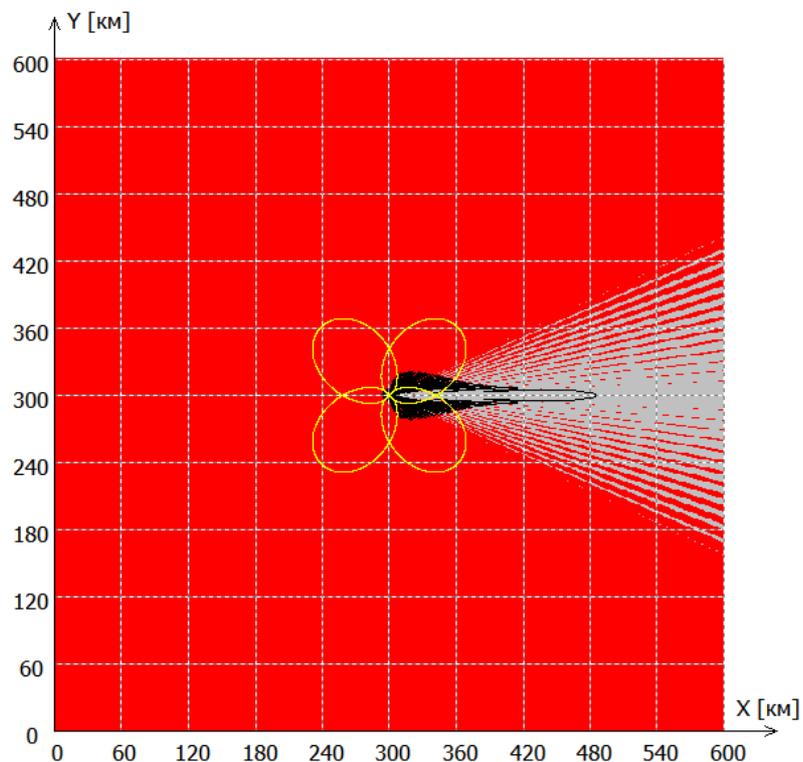


Рисунок 2.19 - ЗМИ РЛС малой дальности, САП<sub>1</sub>, САП<sub>2</sub>, САП<sub>3</sub>, САП<sub>4</sub> расположены на позиции РЛС,  $P_{\text{САП}_1} = P_{\text{САП}_2} = P_{\text{САП}_3} = P_{\text{САП}_4} = 6000$  Вт,

$$\beta_{\text{ГЛ РЛС}} = 90^\circ.$$

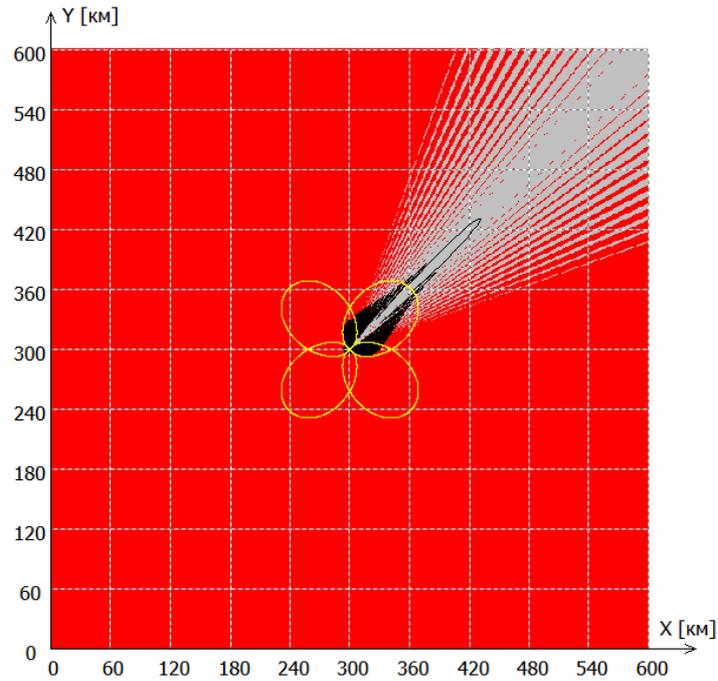


Рисунок 2.20 - ЗМИ РЛС малой дальности, САП<sub>1</sub>, САП<sub>2</sub>, САП<sub>3</sub>, САП<sub>4</sub> расположены на позиции РЛС,  $P_{\text{САП}_1} = P_{\text{САП}_2} = P_{\text{САП}_3} = P_{\text{САП}_4} = 6000$  Вт,  $\beta_{\text{ГЛ РЛС}} = 45^\circ$ .

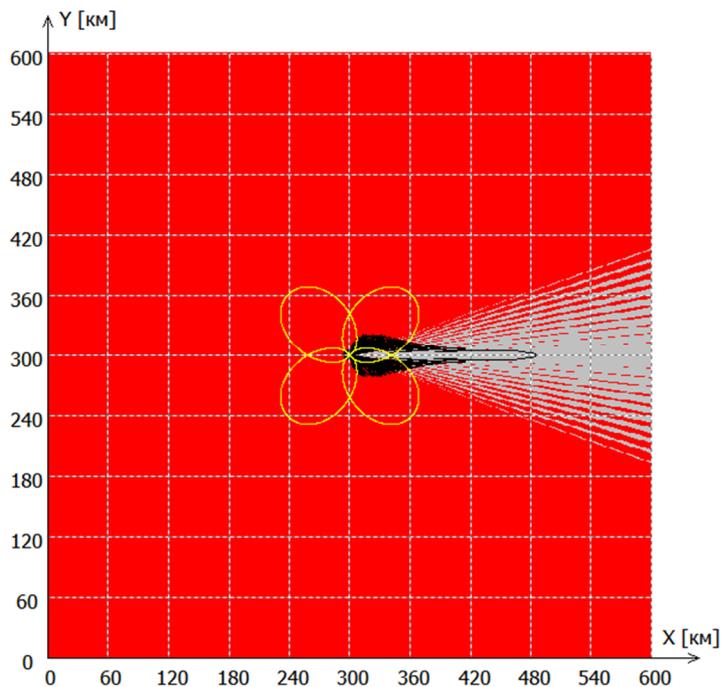


Рисунок 2.21 - ЗМИ РЛС малой дальности, САП<sub>1</sub>, САП<sub>2</sub>, САП<sub>3</sub>, САП<sub>4</sub> расположены на позиции РЛС,  $P_{\text{САП}_1} = P_{\text{САП}_2} = P_{\text{САП}_3} = P_{\text{САП}_4} = 10000$  Вт,  $\beta_{\text{ГЛ РЛС}} = 90^\circ$ .

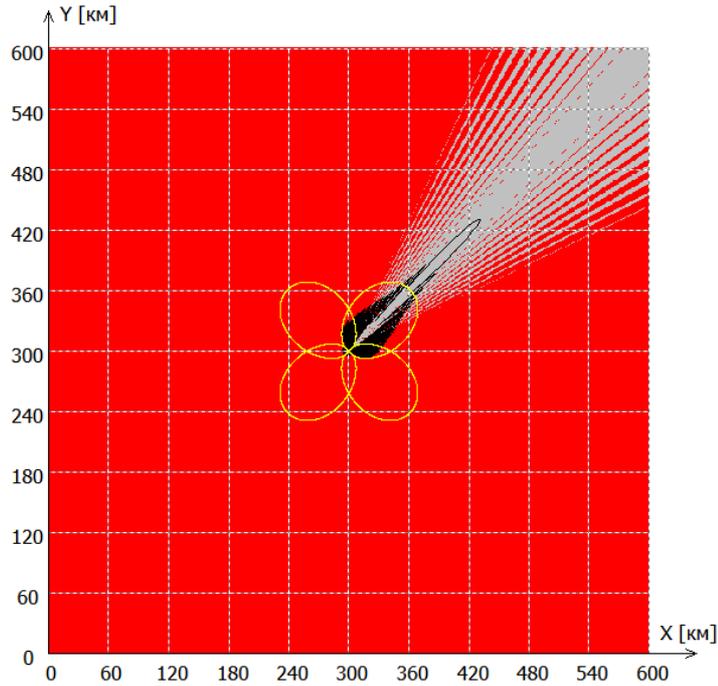


Рисунок 2.22 - ЗМИ РЛС малой дальности, САП<sub>1</sub>, САП<sub>2</sub>, САП<sub>3</sub>, САП<sub>4</sub> расположены на позиции РЛС,  $P_{САП_1} = P_{САП_2} = P_{САП_3} = P_{САП_4} = 10000$  Вт,  $\beta_{ГЛ\ РЛС} = 45^\circ$ .

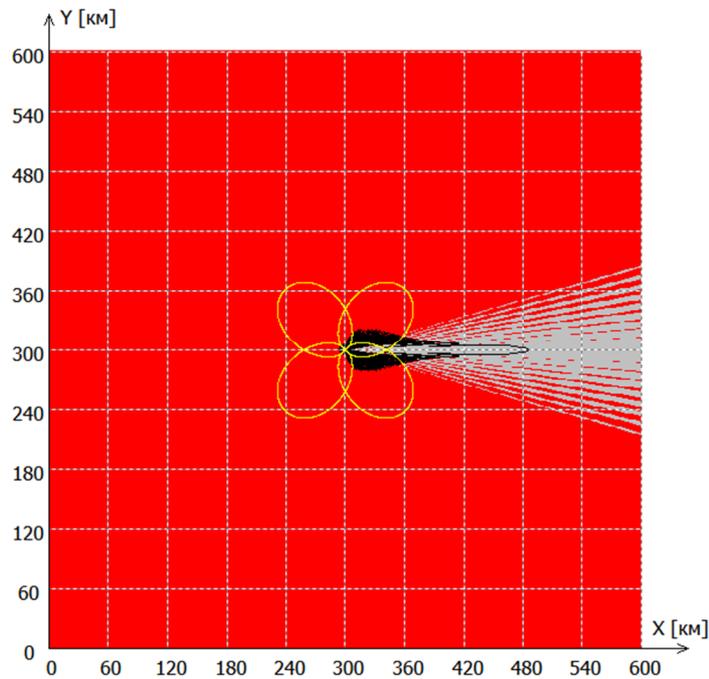


Рисунок 2.23 - ЗМИ РЛС малой дальности, САП<sub>1</sub>, САП<sub>2</sub>, САП<sub>3</sub>, САП<sub>4</sub> расположены на позиции РЛС,  $P_{САП_1} = P_{САП_2} = P_{САП_3} = P_{САП_4} = 15000$  Вт,  $\beta_{ГЛ\ РЛС} = 90^\circ$ .

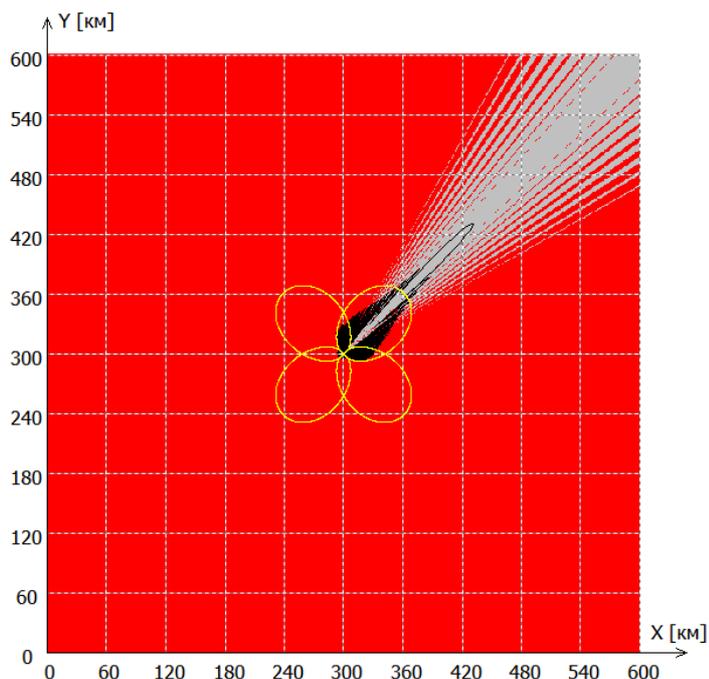


Рисунок 2.24 - ЗМИ РЛС малой дальности, САП<sub>1</sub>, САП<sub>2</sub>, САП<sub>3</sub>, САП<sub>4</sub> расположены на позиции РЛС,  $P_{САП_1} = P_{САП_2} = P_{САП_3} = P_{САП_4} = 15000$  Вт,  $\beta_{ГЛ\ РЛС} = 45^\circ$ .

Результаты расчетов зон маскировки излучения защищаемых РЛС, отраженные на рисунках, указывают на следующее.

При установке на платформе защищаемого РЛС малой дальности двух САП шумового прикрытия мощностью 5 кВт каждое, антенны которых имеют ширину ДН  $\theta_{в\ САП} = 60^\circ$  и разнос ДН по азимуту  $\Delta_{в\ САП} = 20^\circ$ , ширина углового сектора, в котором обеспечивается маскировка бокового излучения РЛС, достигает  $348^\circ$ . Незамаскированной оказывается угловая зона БЛ ДН антенны РЛС, не превышающая  $12 \theta_{в\ РЛС}$  ( $\theta_{в\ РЛС}$  – ширина главного лепестка ДН антенны РЛС по азимуту, составляющая для данного примера  $1^\circ$ ). Размещение на позиции РЛС малой дальности четырех САП шумового прикрытия РЛС с мощностью 7 кВт каждое, перекрывающих совместно  $360^\circ$  по азимуту, обеспечивает зону маскировки бокового излучения РЛС шириной до  $359^\circ$ . Незамаскированным остается зондирующее и боковое излучение РЛС в угловом секторе примерно  $11^\circ$ , что составляет  $11 \theta_{в\ РЛС}$ .

При размещении на платформе РЛС средней дальности действия двух САП мощностью 15 кВт каждое, антенны которых имеют ширину ДН  $\theta_{\beta \text{ САП}} = 60^\circ$  и разнос ДН по азимуту  $\Delta_{\beta \text{ САП}} = 40^\circ$ , обеспечивается зона маскировки бокового излучения РЛС шириной примерно  $330^\circ$ . Незамаскированным остается излучение защищаемого РЛС в секторе шириной  $30^\circ$ , то есть,  $15 \cdot \theta_{\beta \text{ РЛС}}$  (в данном случае  $\theta_{\beta \text{ РЛС}} = 2^\circ$ ). При использовании для защиты РЛС средней дальности четырех САП мощностью 15 кВт, размещенных на позиции РЛС и перекрывающих совместно азимутальную зону  $360^\circ$ , обеспечивается маскировка бокового излучения РЛС в секторе  $328^\circ$ , соответственно незамаскированная зона составляет  $32^\circ$  или  $16 \cdot \theta_{\beta \text{ РЛС}}$ .

#### **2.2.4 Электромагнитная совместимость защищаемого РЛС и САП шумовой маскировки излучения РЛС**

При организации шумовой маскировки рабочего излучения РЛС любых типов от средств РТР неизбежно возникает проблема обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) защищаемого РЛС и САП шумового прикрытия РЛС. Сущность проблемы ЭМС состоит в том, что шум, излучаемый антенной САП прикрытия РЛС, воздействует не только на подавляемое средство РТР, но и на защищаемое РЛС, приводя к ухудшению характеристик радиолокационного наблюдения. Существуют три канала проникновения шума, излучаемого САП, в приемный тракт РЛС.

Первый канал – распространение поля ШП по трассе «САП - РЛС» (канал «прямое проникновение ШП»). Излучение в направлениях боковых лепесткам ДН антенны САП прикрытия (боковое излучение САП прикрытия) действует на РЛС с направлений боковых или главного лепестков ДН его антенны. Мощность паразитной шумовой наводки в приемном тракте РЛС зависит от усиления антенны РЛС в направлении САП прикрытия, от уровней боковых лепестков ДН антенны САП, а также от расстояния между САП и РЛС.

Второй канал – переотражение ШП, излучаемой САП прикрытия, лоцируемым объектом (ЛА) (канал «переотражение ШП лоцируемым объектом»). Шум, отражаемый лоцируемым объектом («эхошум»), действует в приемном тракте РЛС вместе с полезным эхосигналом от объекта, вызывая ухудшение наблюдения объекта. Мощность «эхошума», зависит от энергопотенциала САП прикрытия и от ЭПР лоцируемого ЛА в направлениях РЛС и САП.

Третий канал – переотражение ШП, излучаемой САП прикрытия РЛС, подстилающей поверхностью (канал «переотражение ШП подстилающей поверхностью»). Излучение САП прикрытия РЛС в процессе радиоподавления средства РТР может «подсвечивать» подстилающую поверхность. Поле ШП, отражаемое подстилающей поверхностью, может воздействовать на защищаемое РЛС, вызывая ухудшение наблюдения объектов радиолокации. Характеристики этого канала зависят от рельефа местности, электрических характеристик подстилающей поверхности, характера отражения (зеркальное, диффузное), поляризации поля ШП и др.

Для решения проблемы ЭМС защищаемого РЛС и САП прикрытия необходима разработка специальных мер, направленных на устранение (ослабление) влияния шума, излучаемого САП, на защищаемое РЛС.

### **2.3 Имитация и искажение излучения защищаемого РЛС**

Имитация и искажение излучения защищаемого РЛС составляют, по существу, *дезинформирование* средств РТР противной стороны относительно РЛС. Цель дезинформирования заключается в создании у противной стороны ложного или искаженного представления о параметрах излучения (радиотехнических параметрах) защищаемого РЛС или(и) о параметрах пространственного положения (нерадиотехнических параметрах) РЛС, что затрудняет ведение разведки РЛС. Достижение этой цели может быть

обеспечено созданием дополнительных излучений (дезинформирующих помех) с позиции защищаемого РЛС или с других позиций.

### **2.3.1 Сущность имитации и искажения излучения РЛС**

Далее рассматриваются возможные варианты дополнительных излучателей – источников дезинформирующих помех подавляемому средству РТР.

*Вариант 1.* Пусть излучение дезинформирующей помехи создается таким образом, что оно разрешается подавляемым средством РТР с рабочим излучением защищаемого РЛС хотя бы по одному радиотехническому параметру (частоте, времени действия, поляризации, форме сигнала), а также по угловому направлению (например, по азимуту). Тогда помеха создает для средства РТР эффект присутствия дополнительного излучателя с параметрами, отличающимся соответствующим образом от параметров рабочего излучения РЛС, на другой пространственной позиции.

Если отличия радиотехнических параметров дополнительного излучателя и защищаемого РЛС значительны, то дополнительный излучатель идентифицируется средством РТР как отдельное РЭС, которое также может быть объектом разведки.

Если же отличия радиотехнических параметров излучателей незначительны, то дополнительный излучатель идентифицируется как однотипный с разведкуемым РЛС, но расположенный, на другой пространственной позиции. Такой случай имеет место, когда дополнительный излучатель является имитатором защищаемого РЛС («САП имитации излучения РЛС»). Соответствующая дезинформирующая помеха - это имитирующая помеха (ИмП) типа «Ложная позиция РЛС». Этот вариант ИмП реализуется при размещении САП имитации на достаточно большом расстоянии от защищаемого РЛС.

*Вариант 2.* Излучение защищаемого РЛС и дополнительного излучателя – источника дезинформирующей помехи разрешаются подавляемым средством РТР хотя бы по одному из радиотехнических параметров (частоте, времени, форме излучаемых сигналов), и не разрешаются по угловому направлению. В этом случае помеха создает на стороне подавляемого средства РТР эффект функционирования разведываемого РЛС в дополнительном режиме излучения, характеризующемся излучением на своих несущих частотах, формой излучаемых сигналов и др. Такая дезинформирующая помеха – это имитирующая помеха типа «Ложное зондирующее излучение защищаемого РЛС». Частными случаями могут быть ИмП типов «Ложные частоты излучения РЛС», «Ложные зондирующие сигналы РЛС» и другие.

*Вариант 3.* Излучение защищаемого РЛС и дополнительного излучателя – источника дезинформирующей помехи создается таким образом, что оно не разрешается подавляемым средством РТР ни по одному из радиотехнических параметров (частоте, времени излучения, форме излучаемых сигналов), а также не разрешается по угловому направлению. Иначе говоря, сигналы защищаемого РЛС и помеха действуют в одном элементе разрешения подавляемого средства РТР. Действие дезинформирующей помехи такого типа приводит к искажению излучения защищаемого РЛС, действующего на входах приемных трактов средства РТР за счет аддитивного взаимодействия (суммировании) с этим излучением. Дезинформирующие помехи такого типа – это помехи искажающего действия или «искажающие помехи» (ИсП).

Следствием искажения излучения защищаемого РЛС является увеличение ошибок измерения параметров этого излучения измерителями из состава средства РТР.

Например, действие ИсП, искажающей форму огибающей зондирующего импульса РЛС или форму переднего фронта импульса на входе приемного тракта средства РТР, приводит к увеличению ошибок измерения временных параметров разведываемых сигналов, таких, как моменты прихода

импульсов, межимпульсные интервалы, периоды повторения импульсов. Снижение точности измерения временных параметров ведет к ухудшению показателей надежности сортировки импульсных последовательностей и идентификации РЛС. Кроме того, увеличиваются ошибки местоопределения позиции защищаемого РЛС разностно-дальномерными системами РТР.

Другой пример – искажение соотношений амплитуд и фаз сигналов на входах приемных каналов многоканального амплитудного или фазового пеленгатора из состава средства РТР. Наличие таких искажений ведет к увеличению ошибок пеленгования и местоопределения защищаемого РЛС.

### **2.3.2 Возможные варианты применения помех имитирующего и искажающего действия в интересах защиты РЛС**

Ниже рассмотрены некоторые возможности радиоподавления средств РТР, основанные на имитации и искажении излучения защищаемого РЛС.

#### ***Имитирующие помехи средствам РТР***

*1. Имитирующая помеха типа «Ложное зондирующее излучение с позиции защищаемого РЛС».* Представляющими практический интерес вариантами такой ИмП могут быть помехи типа «Ложные частоты излучения РЛС» и «Ложные зондирующие сигналы РЛС».

Средства создания ИмП типа «Ложное зондирующее излучение с позиции защищаемого РЛС» (САП имитации) могут размещаться на платформе защищаемого РЛС, в пределах позиции РЛС или быть встроенными в РЛС.

Существенно, что при создании ИмП типа «Ложное зондирующее излучение с позиции РЛС» защищаемое РЛС не использует излучаемые дополнительные рабочие сигналы как зондирующие и не ведет прием соответствующих им эхосигналов. Создание ИмП такого типа может быть

направлено на противодействие постановщикам активных радиопомех противной стороны, в частности, постановщикам прицельных по частоте активных маскирующих помех (например, ШП) и имитирующих помех, копирующих зондирующие сигналы РЛС, создающих для РЛС ложные радиолокационные отметки и траектории, усложняющие наблюдаемую сигнально-помеховую обстановку.

Эффект от излучения ложных зондирующих сигналов, форма и несущая частота которых отличается от формы и частоты истинных зондирующих сигналов защищаемого РЛС, заключается в отвлечении ресурсов разведки, запоминания сигналов, формирования радиопомех, а также энергетических ресурсов, имеющихся в распоряжении постановщика помех, на «обслуживание» ложных частот и ложных зондирующих сигналов. Радиопомехи, сформированные противной стороной на основе ложного зондирующего излучения, не обладают для защищаемого РЛС мешающим эффектом.

## *2. Имитирующая помеха типа «Ложная позиция защищаемого РЛС».*

Предполагается установка полномасштабного имитатора излучающей части защищаемого РЛС, включающего формирователь зондирующих сигналов, передающее устройство и антенну, на пространственной позиции, удаленной от РЛС. Таким образом, реализуется ИмП типа «Ложная позиция защищаемого РЛС». Согласование программ обзора пространства РЛС и имитатора, а также синхронизация излучения РЛС и имитатора по моментам излучения, частотам и форме излучаемых сигналов, отсутствует, при этом защищаемое РЛС и имитатор разрешаются по радиотехническим параметрам (частоте, времени излучения зондирующих сигналов, форме сигналов). Расстояние между РЛС и имитатором выбирается исходя из точности (величины линейной ошибки) местоопределения излучающих объектов на местности, обеспечиваемой средствами РТР противной стороны. А именно, расстояние должно быть достаточным, чтобы РЛС и имитатор

воспринимались средствами РТР как два пространственно разнесенных объекта. В качестве имитатора может использоваться, например, РЛС, однотипное с защищаемым РЛС, выработавшее свой ресурс или выведенное из эксплуатации, но имеющее исправные антенну и передающее устройство.

Эффект от создания ИмП типа «Ложная позиция защищаемого РЛС» заключается в отвлечении временного и технического ресурса средств разведки и поражения противной стороны на «обслуживание» объекта, расположенного на ложной позиции.

3. *Имитирующая помеха типа «Ложное зондирующее излучение РЛС с позиции, вынесенной за пределы позиции РЛС».* Имитатор излучения защищаемого РЛС (САП имитации) вынесен за пределы позиции защищаемого РЛС, например, в направлении зоны расположения средств РТР противной стороны на некоторое расстояние  $r_{\text{РЛС}}^{\text{САП}}$ , настолько большое, что условие  $r_{\text{РЛС}}^{\text{САП}} \leq \delta_{\text{СРТР}}$  может не выполняться, пеленгатор средства РТР может наблюдать РЛС и САП имитации отдельно благодаря их разрешению по радиотехническим параметрам либо по углу (здесь  $\delta_{\text{СРТР}}$  – линейное разрешение объектов на местности средством РТР). Привлекательность такого размещения САП - имитатора излучения РЛС по сравнению с размещением близко от РЛС состоит в том, что требуемая мощность САП – имитатора уменьшается при его удалении от защищаемого РЛС и при приближении к зоне расположения средства РТР. При достаточно малом расстоянии  $r_{\text{САП}}^{\text{СРТР}}$  между САП и СРТР реализация мощности САП, требуемой для имитации излучения РЛС в главном лепестке ДН его антенны (зондирующего излучения РЛС)), может быть уже не столь проблематичной, как это имеет место при размещении САП со слабонаправленной антенной в районе позиции защищаемого РЛС. За счет этого обеспечивается более близкое подобие излучения имитатора излучению защищаемого РЛС. Соответственно, затрудняется идентификация имитаторов излучения РЛС средствами РТР

противной стороны по результатам анализа энергетических параметров излучений САП имитации.

Существенно, что относительно маломощный имитатор излучения РЛС может быть размещен на малых объектах, например, на БЛА. Он может быть реализован также в виде САП разового действия (САП РД). Имитаторы в виде САП РД могут доставляться в район расположения СРТР противника с помощью пилотируемых ЛА и БЛА, специальных УР и т.п.

Техническая реализация САП имитации излучения РЛС возможна на базе ретранслятора, приемная антенна которого ориентируется в направлении защищаемого РЛС, а передающая антенна – в направлении зоны возможного расположения средств РТР противной стороны.

В случаях размещения САП имитации излучения РЛС на БЛА и применения САП РД количество имитаторов, привлекаемых для защиты РЛС, может быть большим. Реализация САП имитации излучения РЛС на базе ретрансляторов обеспечивает высокую точность имитации зондирующих сигналов защищаемого РЛС. Указанные обстоятельства способствуют повышению эффективности защиты РЛС.

Эффект от создания ИмП типа «Ложное зондирующее излучение РЛС с позиций, вынесенных за пределы позиции РЛС» заключается в отвлечении временного и технического ресурса средств разведки и поражения противной стороны на «обслуживание» ложных излучателей.

### ***Искажающие помехи средствам РТР***

Организация защиты РЛС от средств РТР путем искажения излучения РЛС отличается тем, что САП, решающее задачу защиты РЛС, формирует специальное излучение, действие которого приводит к искажению формы сигналов и (или) информационных параметров излучения защищаемого РЛС на входе приемно-измерительных каналов средств РТР. Искажение излучения РЛС затрудняет ведение РТР этого РЛС. Объектами подавления в данном

случае являются измерительные каналы средств РТР, например, каналы измерения временных параметров, частотного анализа, пеленгования. С точки зрения экономии энергетических затрат наибольший интерес представляет защита РЛС путем искажения его излучения, действующего в направлениях боковых лепестков ДН антенны, которое является копией зондирующего излучения и предоставляет средствам РТР почти все возможности ведения разведки РЛС.

Требуемый характер искажения тех или иных параметров излучения РЛС определяется характеристиками измерительных каналов тех средств РТР, которым необходимо противодействовать.

Реализации ИсП по своей форме могут быть, например, сигналоподобными. Формирование сигналоподобных ИсП может выполняться путем переизлучения сигналов защищаемого РЛС со сдвигом по времени или (и) частоте. Это может быть реализовано на базе ретрансляторов или средств запоминания и воспроизведения сигналов защищаемого РЛС. Величина сдвига по времени и частоте не должна превышать размера элемента разрешения дезинформируемого средства РТР по соответствующему параметру.

Искажение излучения защищаемого РЛС может быть достигнуто также путем использования ИсП «несигналоподобного» (генераторного) типа. Например, возможно применение в качестве ИсП реализаций шума. Мощность, ширина и частотный сдвиг спектра ШП, должны обеспечивать достаточный уровень искажения сигналов РЛС с учетом требований электромагнитной совместимости РЛС и САП искажения.

Варианты организации защиты РЛС от средств РТР путем искажения параметров рабочего излучения РЛС могут быть следующими.

*Искажающие помехи пеленгованию защищаемого РЛС.* В этом случае САП защиты РЛС должно формировать излучения, действие которых приводит к искажению пеленгационных характеристик пеленгаторов средств

РТР. Требуемый вид этих излучений зависят от типа подавляемого пеленгатора. В современных средствах РТР обычно используются многоканальные амплитудные и фазовые пеленгаторы [53, 56].

В многоканальных амплитудных пеленгаторах информация об угловом направлении на излучатель содержится в соотношении амплитуд сигналов пеленгуемого РЭС на выходах совокупности приемных каналов. Информационными параметрами, измеряемыми пеленгатором средства РТР, являются амплитуды принятых сигналов. Противодействие такому пеленгатору возможно путем создания помех, искажающих соотношение амплитуд сигналов на входах приемных каналов. Защищаемое РЛС и САП защиты этого РЛС должны располагаться на разных пространственных позициях в пределах одного углового элемента разрешения пеленгатора средства РТР. При этом излучения САП и защищаемого РЛС должны перекрываться (не должны разрешаться) по радиотехническим параметрам (частоте, времени излучения, форме излучаемых сигналов, поляризации).

В многоканальных фазовых пеленгаторах измеряемыми информационными параметрами являются соотношения фаз (обычно разности фаз) сигналов пеленгуемого РЭС на входах приемных каналов пеленгатора, антенны которых разнесены в пространстве. Для противодействия фазовому пеленгатору необходимо исказить соотношения фаз сигналов на входах каналов. Такое искажение возможно, если мешающие излучения создаются из нескольких точек пространства, причем излучатели, расположенные на разных пространственных позициях, взаимно когерентны. Вариантами помех искажающего действия пеленгаторам средств РТР могут быть следующие.

*1. Искажающая помеха пеленгатору средства РТР типа «Смещение пеленга в направлении эквивалентного энергетического центра совокупности излучателей».* Организация защиты поясняется на рисунке 2.32.

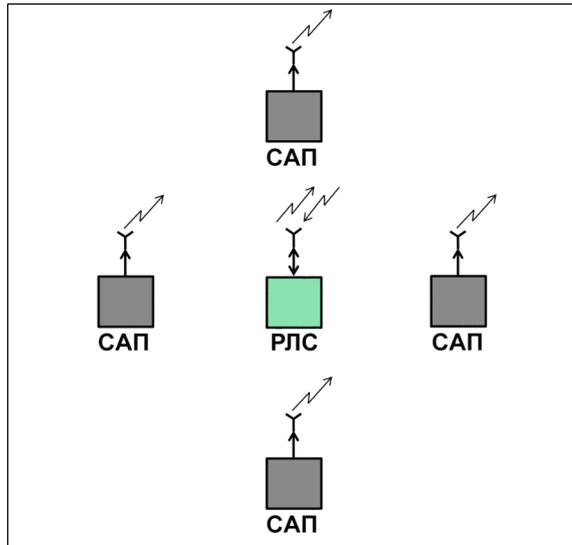


Рисунок 2.32 – Расположение САП при организации защиты типа «Смещение пеленга в направлении эквивалентного энергетического центра совокупности излучателей».

Расстояние  $r_{САП}^{РЛС}$  между позициями САП и РЛС выбирается из условия:

$$r_{САП}^{РЛС} \leq \delta_{СРТР},$$

где  $\delta_{СРТР}$  – линейная разрешающая способность пеленгатора СРТР. Это условие обычно выполняется, если САП расположено на позиции РЛС или близко от нее. Кроме того, излучение РЛС и САП не должны разрешаться по радиотехническим параметрам (времени, частоте). При выполнении этих условий обеспечивается отсутствие разрешения защищаемого РЛС и САП искажения излучения РЛС пеленгатором из состава средства РТР, оба объекта наблюдаются средством РТР на местности как один.

Излучение САП искажает боковое излучение защищаемого РЛС, а именно, искажает соотношения амплитуд и фаз сигналов на входах приемных каналов пеленгатора. Искажение зондирующего излучения (излучения в главном лепестке ДН антенны), нецелесообразно, так как, ввиду близости САП и РЛС, энергопотенциал САП должен быть, как правило, очень большим

(близким к энергопотенциалу защищаемого РЛС (смотри примеры, рассмотренные в п. 2.2.3)).

Следует отметить, что рассматриваемая конфигурация защищаемого РЛС и САП искажения излучения РЛС широко применяется на практике при организации противодействия пеленгаторам из состава ГСН противорадиолокационных УР (ПРУР) в интересах защиты РЛС от ПРУР. В штатном комплекте защищаемого РЛС, может быть предусмотрено несколько САП - т.н. «отвлекающих передатчиков», каждый из которых реализован, например, на базе ретранслятора или устройства запоминания и воспроизведения сигналов, излучаемых защищаемым РЛС. Мощность САП достаточна для имитации бокового излучения защищаемого РЛС. Все САП в совокупности образуют коллективный излучатель, элементы которого сосредоточены в пределах одного углового элемента разрешения пеленгатора ГСН ПРУР и не разрешаются также по радиотехническим параметрам (времени, частоте, форме сигналов излучения). Наблюдая суммарное излучение, пеленгатор определяет направление на эквивалентный энергетический центр коллективного излучателя, который не совпадает ни с одним из его элементов. Тем самым обеспечивается «промах» ПРУР, величина которого определяется совокупностью параметров коллективного излучателя (количество и мощности «отвлекающих передатчиков», геометрическая конфигурация их расположения на позиции защищаемого РЛС и другие) [7, 19].

*2. Искажающая помеха пеленгатору средства РТР типа «многоточечный когерентный излучатель».* Принципиальная особенность многоточечных когерентных помех (МКП), отличающая их от рассмотренных выше многоточечных некогерентных помех (МНП), состоит в том, что компоненты помехи, излучаемые из различных точек пространства, взаимно когерентны. Это значит, что фазы несущих колебаний процессов, излучаемых из различных точек пространства, устанавливаются в текущий момент

времени целесообразным образом и контролируются. Соотношения и законы изменения фаз определяются типом создаваемой помехи.

Многоточечные когерентные излучатели рассматривались в работах [8, 33, 34, 42, 54]. Рассмотрение двухточечного когерентного излучателя в контексте применения к защите от средств РТР (средств пеленгования) проведено автором в соавторстве с Юдиным В.Н. и опубликовано в [14, 74].

Далее рассматривается вопрос об ошибках разностно-фазового пеленгования двухточечного излучателя на основании работ [14, 74].

Угловое направление на одиночный точечный источник излучения может быть определено по величине разности фаз колебаний на выходах приемных антенн, разнесенных в пространстве. Если приемные антенны  $A_1$  и  $A_2$  пеленгатора расположены в дальней зоне ИИ, то, как известно, угол  $\alpha$ , задающий направление на ИИ в плоскости пеленгования относительно нормали к прямой, соединяющей  $A_1$  и  $A_2$ , может быть определен как

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\Delta\varphi}{k b}\right), \quad (2.11)$$

где  $b$  – расстояние между  $A_1$  и  $A_2$  (база пеленгатора);  $\Delta\varphi$  – разность фаз колебаний на выходах антенн  $A_1$  и  $A_2$ ;  $k=2\pi/\lambda$  – волновое число;  $\lambda$  – длина волны излучения ИИ. Согласно (2.11), чтобы определить угловое направление на ИИ, нужно измерить величину  $\Delta\varphi$  разности фаз колебаний на выходах антенн.

Ошибки, возникающие при разностно-фазовом пеленговании ИИ на базе соотношения (2.11), связаны с влиянием ряда факторов, к которым относятся:

- возможная неоднозначность определения углового направления по результатам измерения  $\Delta\varphi$ , возникающая, если разность хода лучей от ИИ до антенн  $A_1$  и  $A_2$  превышает величину  $\lambda$ ;

- внешние условия (среда распространения радиоволн, подстилающая поверхность, отражения от различных объектов, расположенных в зоне действия пеленгатора) и другие.

В данном случае представляет интерес вопрос о влиянии на ошибку разностно-фазового пеленгования такого фактора, как наличие у пеленгуемого ИИ зависимости фазы излучаемой волны от углового направления в плоскости пеленгования. Такая фазоугловая зависимость характерна для многоточечных и пространственно протяженных излучателей, поле излучения которых в любой точке пространства формируется как результат интерференции, при этом имеют место искривления линии фазового фронта суммарной волны.

Наличие зависимости  $\varphi(\beta)$  фазы волны от углового направления  $\beta$  в плоскости пеленгования приводит к тому, что разность фаз колебаний на выходах антенн  $A_1$  и  $A_2$  пеленгатора зависит не только от угла падения волны на базу пеленгатора, как это заложено в соотношении (2.11). В отличие от случая одноточечного излучателя, фазоугловая характеристика которого равномерна в секторе  $360^\circ$  и фронт волны – плоский в любой точке дальней зоны излучателя, разность фаз  $\Delta\varphi$  колебаний на выходах пеленгационных антенн  $A_1$  и  $A_2$  содержит дополнительную составляющую  $\Delta\varphi_{\text{доп}}$ , обусловленную наличием фазоугловой зависимости, а именно, справедливо:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} b \sin(\alpha) + \Delta\varphi_{\text{доп}}. \quad (2.12)$$

Величина  $\Delta\varphi_{\text{доп}}$  есть разность  $\Delta\varphi_{\text{доп}} = \varphi(\beta_2) - \varphi(\beta_1)$ , где  $\beta_1$  и  $\beta_2$  – угловые направления на антенны  $A_1$  и  $A_2$  из точки фазового центра излучателя в плоскости пеленгования.

Наличие обсуждаемой фазоугловой зависимости (2.12) приводит к тому, что получаемое с использованием (2.11) значение пеленга ИИ (измеренное значение пеленга) составляет

$$\alpha_{\text{изм}} = \arcsin\left(\frac{\frac{2\pi}{\lambda}b \sin(\alpha) + \Delta\varphi_{\text{доп}}}{\frac{2\pi}{\lambda}b}\right) = \arcsin\left(\sin(\alpha) + \frac{\Delta\varphi_{\text{доп}}}{\frac{2\pi}{\lambda}b}\right),$$

и при любом фиксированном  $\alpha$  величина

$$\alpha_{\text{ош}} = \arcsin\left(\sin(\alpha) + \frac{\Delta\varphi_{\text{доп}}}{\frac{2\pi}{\lambda}b}\right) - \alpha \quad (2.13)$$

представляет собой ошибку измерения угла  $\alpha$ , обусловленную наличием у пленгуемого излучателя фазоугловой зависимости.

При известном характере фазоугловой зависимости  $\varphi(\beta)$  величина  $\Delta\varphi_{\text{доп}} \equiv \Delta\varphi_{\text{доп}}(\beta)$  может быть определена в первом приближении как

$$\Delta\varphi_{\text{доп}}(\beta) \approx \frac{d\varphi(\beta)}{d\beta} \delta, \quad (2.14)$$

где  $\delta = \beta_2 - \beta_1$  – угол, под которым база пленгатора наблюдается из точки фазового центра пленгуемого ИИ. Для угла  $\delta$  справедливо приближение

$$\delta \approx \frac{b \cos(\alpha)}{r}, \quad (2.15)$$

где  $r$  – расстояние между точками фазового центра пленгуемого излучателя и центра базы пленгатора. С учетом (2.14) и (2.15) ошибка пленгования (2.13) определяется как

$$\alpha_{\text{ош}} = \arcsin\left(\sin(\alpha) + \frac{\frac{d\varphi(\beta)}{d\beta} \cos(\alpha)}{\frac{2\pi}{\lambda}r}\right) - \alpha. \quad (2.16)$$

В представляющем наибольший интерес частном случае  $\alpha=0$  (нормаль к базе пеленгатора в точке ее центра ориентирована в направлении точки фазового центра пеленгуемого излучателя), вместо (2.15) получаем

$$\alpha_{\text{ош}\alpha=0} = \arcsin\left(\frac{\frac{d\varphi(\beta)}{d\beta}}{\frac{2\pi}{\lambda}r}\right). \quad (2.17)$$

Соотношение (2.16) показывает, что ошибка разностно-фазового пеленгования, вызываемая наличием у пеленгуемого ИИ фазоугловой зависимости, различна для разных угловых направлений  $\beta$  и определяется скоростью изменения (производной) фазоугловой характеристики в соответствующем направлении, а также длиной волны излучения ИИ и расстоянием между ИИ и пеленгатором.

Конкретизацию приведенных выше соотношений проведем для случая, когда антенны излучателей  $I_1$  и  $I_2$  – линейные вибраторы, ориентированные относительно плоскости пеленгования вертикально, при этом плоскость пеленгования является экваториальной плоскостью вибраторов. В этом случае, как известно [43], амплитудно-угловая и фазоугловая характеристики парного излучателя в экваториальной плоскости вибраторов без учета их взаимного влияния имеют соответственно вид

$$A(\beta) = \sqrt{1 + \rho^2 + 2\rho \cos(kd \sin(\beta) + \Psi)}, \quad (2.18)$$

$$\varphi(\beta) = -\arctg\left[\frac{\sin\left(\frac{kd}{2}\sin(\beta)\right) - \rho \sin\left(\frac{kd}{2}\sin(\beta) + \Psi\right)}{\cos\left(\frac{kd}{2}\sin(\beta)\right) + \rho \cos\left(\frac{kd}{2}\sin(\beta) + \Psi\right)}\right], \quad (2.19)$$

где  $\rho \leq 1$  – отношение амплитуд токов, протекающих во втором и первом вибраторах;  $\Psi$  – разность фаз токов, протекающих во втором и первом

вибраторов. Производная фазоугловой характеристики (2.18), фигурирующая в (2.16) и (2.17), как можно убедиться, проведя соответствующие вычисления, определяется соотношением

$$\frac{d\phi(\beta)}{d\beta} = -\frac{kd(1-\rho^2)\cos(\beta)}{2[1+\rho^2+2\rho\cos(kd\sin(\beta)+\Psi)]}. \quad (2.20)$$

С учетом (2.20) соотношение (2.17), определяющее ошибку пеленгования парного вибраторного когерентного излучателя как функцию угла  $\beta$ , принимает вид

$$\alpha_{\text{ош}}(\beta)_{\alpha=0} = \arcsin\left(-\frac{d(1-\rho^2)\cos(\beta)}{2r[1+\rho^2+2\rho\cos(kd\sin(\beta)+\Psi)]}\right). \quad (2.21)$$

Полученные выше соотношения позволяют выполнить расчеты УПОП для любых представляющих интерес значений параметров рассматриваемой задачи и анализировать полученные результаты.

Ниже представлены результаты расчетов, выполненных на основе (2.18), (2.19) и (2.21) для одного варианта исходных данных.

На рисунках 2.33 и 2.34 представлены фрагменты амплитудно-угловой  $A(\beta)$  и фазоугловой  $\phi(\beta)$  характеристик парного излучателя, рассчитанные на основе (2.18) и (2.19) при следующих параметрах задачи:  $\lambda=20$  см,  $d=350$  м,  $r=10$  км,  $\rho=0,85$ ,  $\beta \in [-0,082^\circ, 0,082^\circ]$ . Из рисунка 2.34 видно, что имеет место существенная зависимость фазы колебания, излучаемого парным излучателем, от угла  $\beta$ . Фазоугловая характеристика (ФУХ)  $\phi(\beta)$  принимает нулевые значения только для углов  $\beta$ , соответствующих максимумам амплитудно-угловой характеристики (АУХ)  $A(\beta)$ . В направлениях, где АУХ  $A(\beta)$  принимает минимальные значения, имеют место экстремумы ФУХ  $\phi(\beta)$ . Экстремальные значения ФУХ определяются параметрами парного излучателя.

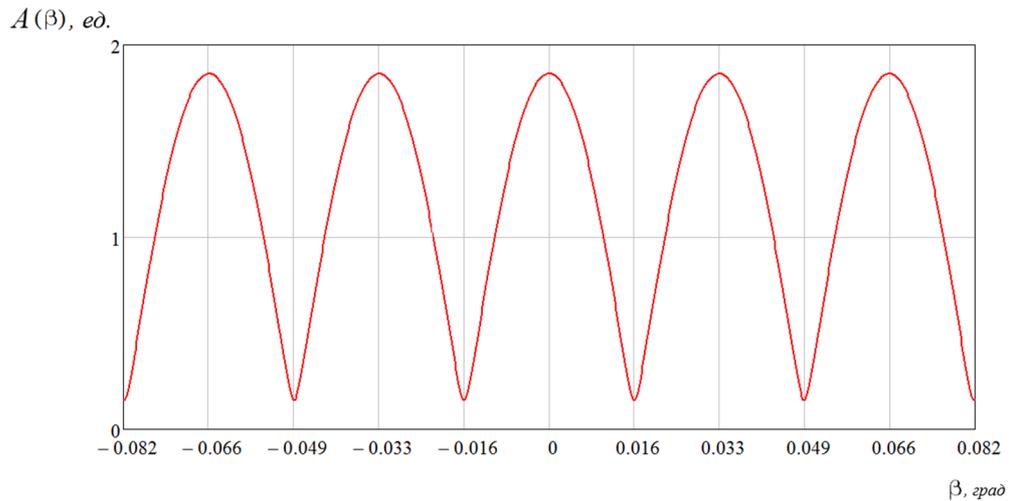


Рисунок 2.33 - Амплитудно-угловая характеристика парного излучателя

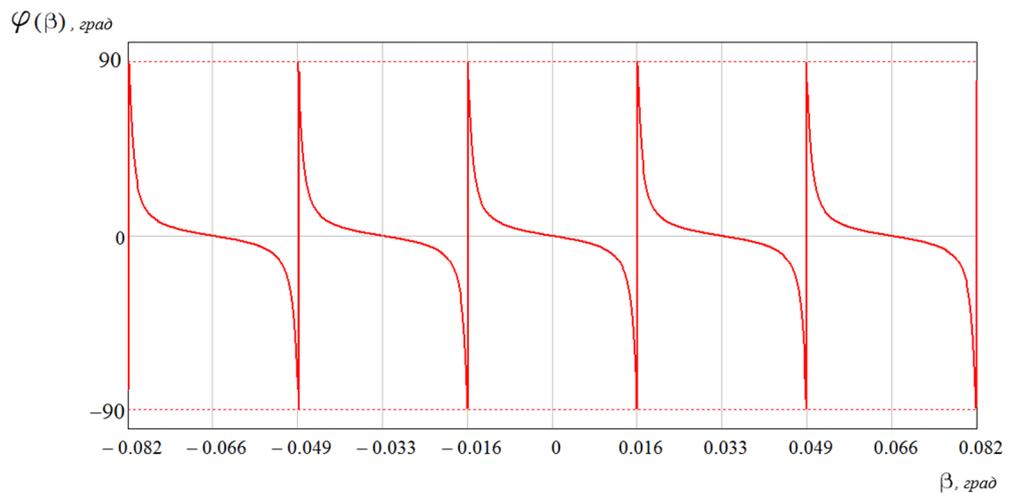


Рисунок 2.34 - Фазоугловая характеристика парного излучателя

На рисунке 2.35 представлен фрагмент графика зависимости модуля ошибки  $\alpha_{\text{ош}}$  пеленгования парного излучателя от углового направления  $\beta$  на центр базы пеленгатора (угловая панорама ошибок пеленгования (УПОП)), соответствующий отрезку  $\beta \in [-0,082^\circ, 0,082^\circ]$ . Расчеты графика выполнены на основе (2.21) при указанных выше исходных данных. Видно, что ошибка пеленгования максимальна в точках, где АУХ принимает минимальные, а

ФУХ – экстремальные значения. Значения максимумов ошибки определяются параметрами задачи. В промежутках между максимумами ФУХ ошибка быстро уменьшается, и в точках максимумов АУХ принимает нулевые значения. Вид УПОП на рисунке 2.35 указывает на наличие угловых зон с повышенными уровнями ошибок пеленгования (зон ПУОП). Из результатов расчетов, приведенных ниже, видно, что параметры угловых зон ПУОП (ширина, период повторения, максимальные значения ошибок пеленгования) зависят от параметров двухточечного излучателя (база  $b$ , разность фаз  $\Psi$ , отношение амплитуд токов в вибраторах  $\rho$ ), а также от расстояния  $r$  между пеленгатором и излучателем.

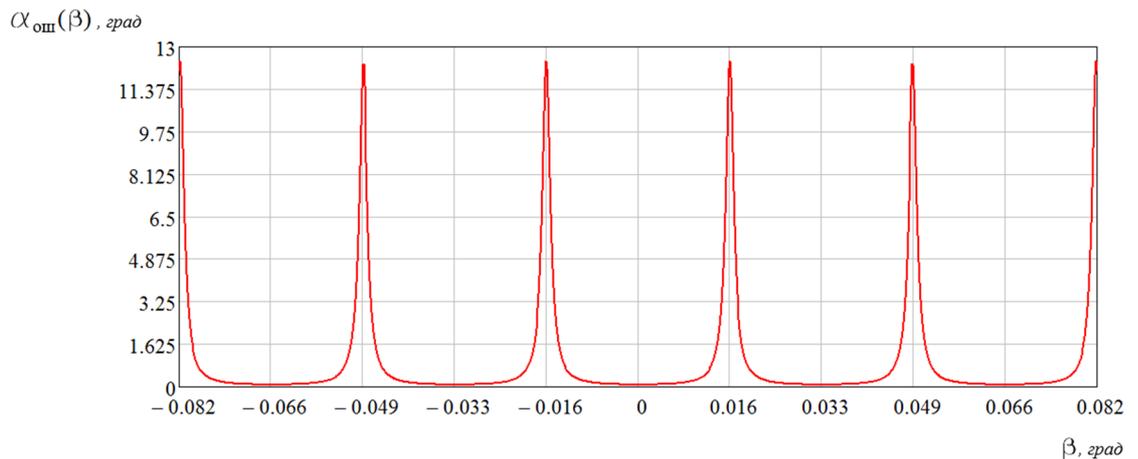


Рисунок 2.35 - Угловая панорама ошибок пеленгования парного излучателя.

На рисунках 2.36, 2.37 и 2.38 представлены фрагменты УПОП при различных значениях указанных выше основных параметров рассматриваемой задачи.

Рисунок 2.36 отображает влияние расстояния  $r$  между пеленгатором и парным излучателем на величину  $\alpha_{\text{ош}}$  в пределах одиночной зоны ПУОП.

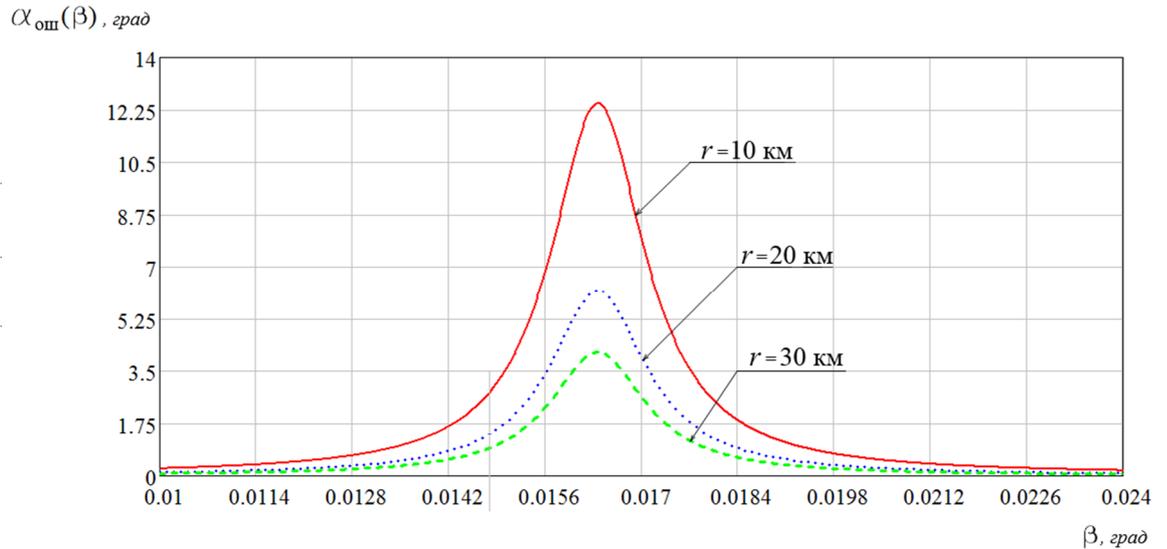


Рисунок 2.36 - Одиночная зона ПУОП при различных значениях расстояния  $r$  до излучателя

Видно, что при  $r = 10; 20;$  и  $30$  км значения ошибок пеленгования в направлениях максимумов УПОП составляют соответственно  $12,5^\circ, 6^\circ$  и  $4,5^\circ$ .

Влияние величины базы  $d$  парного излучателя на вид УПОП отображается на рисунке 2.37. Приведены три кривые, соответствующие различным значениям  $d$ : кривая 1 –  $d = 150$  м, кривая 2 –  $d = 250$  м, кривая 3 –  $d = 350$  м при  $r = 10$  км.

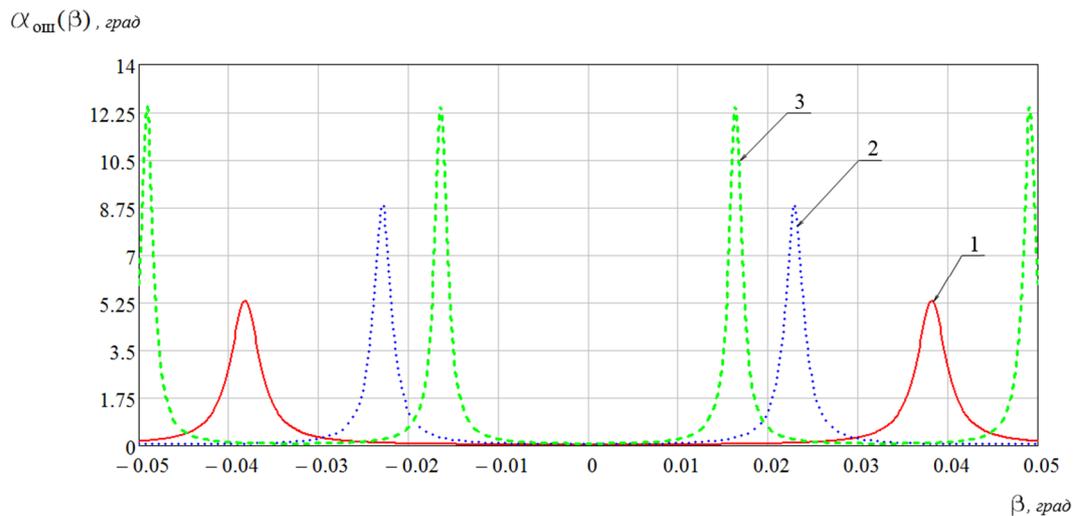


Рисунок 2.37 - Фрагмент УПОП при различных значениях базы парного излучателя

Из рисунка 2.37 видно, что при  $d = 150$  м,  $d = 250$  м,  $d = 350$  м, значения максимумов УПОП составляют соответственно  $5,25^\circ$ ;  $8,75^\circ$  и  $12,5^\circ$ .

Влияние параметра  $\rho$  на вид УПОП отображается на рисунке 2.38. Приведены четыре кривые, соответствующие различным значениям  $\rho$ : кривая 1 – для  $\rho = 0,7$ , кривая 2 – для  $\rho = 0,85$ , кривая 3 – для  $\rho = 0,9$ , кривая 4 – для  $\rho = 0,95$  при  $r = 10$  км.

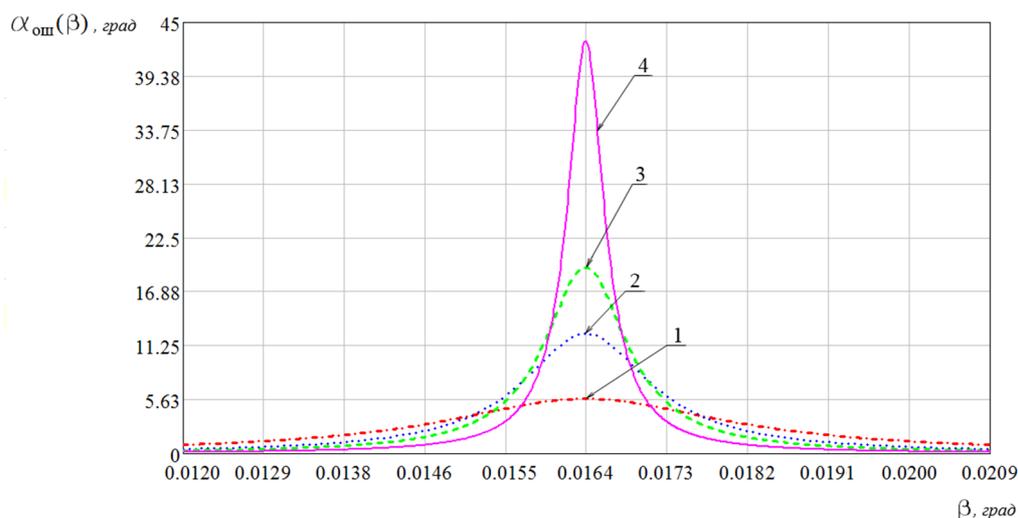


Рисунок 2.38 - Одиночная зона ПУОП при различных значениях параметра  $\rho$

Из рисунка следует, что при  $\rho = 0,7$ ;  $0,85$ ;  $0,9$ ;  $0,95$  значения максимумов УПОП составляют соответственно  $5,7^\circ$ ,  $13^\circ$ ,  $19,5^\circ$ ;  $43^\circ$ .

По результатам проведенного рассмотрения можно сделать следующие выводы:

1. Наличие у пеленгуемого излучателя фазоугловой зависимости приводит к появлению дополнительных ошибок разностно-фазового пеленгования. Величина дополнительной ошибки для конкретного углового направления  $\beta$  определяется скоростью изменения (значением производной) ФУХ в этом направлении. Существенно, что величина дополнительной ошибки пеленгования может быть значительной, что видно из результатов расчетов, выполненных применительно к рассмотренному выше примеру.

2. Ошибка пеленгования парного когерентного излучателя является функцией угла  $\beta$  между нормалью к базе парного излучателя и прямой, проведенной из центра базы пеленгатора в фазовый центр парного излучателя. Зависимость от угла  $\beta$  носит «гребенчатый» характер, а именно, имеет место чередование зон с высокими и низкими уровнями ошибок. Соотношение размеров чередующихся зон и конкретные уровни ошибок в пределах этих зон зависят от параметров парного излучателя (от базы парного излучателя, разности фаз и отношения амплитуд токов в вибраторах), а также от длины волны излучения и от расстояния между пеленгатором и парным излучателем.

3. Результаты расчетов, выполненных применительно к излучателю с длиной волны  $\lambda = 20$  см показывают, что в угловых зонах с высокими уровнями ошибок максимальные значения ошибок достигают  $12,5^\circ$  (рисунок 2.35),  $43^\circ$  (рисунок 2.38). Такие уровни ошибок пеленгования следует признать весьма значительными.

4. Приведенные результаты представляют интерес с точки зрения организации противодействия разностно-фазовому пеленгованию источников излучения средствами радиоподавления. Из обсуждаемых материалов следует, что ошибки пеленгования защищаемых излучателей средствами РТР противной стороны могут быть существенно увеличены, если эти излучатели являются когерентными многоточечными (в частности, двухточечными).

При организации радиоподавления разностно-фазового пеленгатора следует обеспечить такие условия, при которых защищаемый излучатель располагается в пределах одной из угловых зон, характеризующихся повышенными уровнями ошибок пеленгования (ПУОП) подавляемого пеленгатора (рисунок 2.35). Следует отметить, что возможность выполнения таких условий необходимо анализировать при решении каждой конкретной задачи. Поиск приемлемых технических решений применительно к различным задачам, представляющим практический интерес, составляет в настоящее время предмет исследований.

*Искажающие помехи местоопределению защищаемого РЛС средствами РТР.* Для определения координат излучателей в РТР используются методы пассивной радиолокации, из которых наибольшее применение получили угломерный (пеленгационный) и разностно-дальномерный методы [25].

Угломерный метод местоопределения разведываемого РЭС реализуется с использованием совокупности пеленгаторов, разнесенных в пространстве, либо одиночного пеленгатора, расположенного на движущемся носителе (смотри раздел 1). Пеленгование РЭС на каждой пространственной позиции выполняется на базе амплитудного или фазового методов.

Противодействие местоопределению защищаемого РЛС угломерным методом предполагает противодействие пеленгатору, действующему в составе средства РТР.

Разностно-дальномерный метод местоопределения РЭС отличается тем, что информационными параметрами, измеряемыми на пространственно разнесенных приемных позициях СРТР, являются моменты времени приема сигналов РЭС на этих позициях. Например, при местоопределении импульсного РЛС выполняется измерение момента приема зондирующего импульса РЛС на каждой приемной позиции. Совместная обработка результатов измерений, полученных на всех приемных позициях (определение разностей моментов приема), позволяет определить координаты разведываемого РЭС [59, 82]. Противодействие местоопределению защищаемого РЛС разностно-дальномерным методом должно быть направлено на уменьшение точности измерения времени прихода импульсов на приемных позициях. Это может быть обеспечено, например, путем шумовой маскировки бокового излучения РЛС (смотри выше в п. 2.2). Возможно также излучение ложных зондирующих импульсов в определенные угловые сектора бокового излучения защищаемого РЛС. Ложные импульсы могут излучаться в определенных секторах с упреждением, и (или) с запаздыванием по времени

по отношению к истинным зондирующим импульсам РЛС, а также могут перекрываться по времени с истинными импульсами.

Существенно, что временные позиции, занимаемые упреждающими и запаздывающими ложными импульсами в каждом определенном угловом секторе, отличаются друг от друга и могут быть рандомизированы. Простейший вариант обсуждаемого способа предполагает реализацию только ложных импульсов, перекрывающихся с истинными зондирующими импульсами. При этом моменты излучения ложных импульсов в каждом определенном угловом секторе рандомизированы и назначаются таким образом, что они «накрывают» передние и задние фронты истинных импульсов.

Таким образом, искажение истинных рабочих сигналов РЛС и излучение ложных сигналов в определенных угловых секторах позволяет создавать неопределенность (реализовать скрытие) моментов прихода истинных зондирующих импульсов защищаемого РЛС на каждую приемную позицию РТР.

## **2.4 Выводы по разделу 2**

1. Видами радиоподавления, перспективными для применения в интересах защиты РЛС от средств РТР, являются маскировка, имитация и искажение излучения защищаемого РЛС.

*Маскировка* излучения РЛС направлена на создание неопределенности факта присутствия и параметров излучения, а также координат РЛС. Маскировка является наиболее универсальным средством защиты РЛС, так как она создает для средства РТР неопределенность факта присутствия РЛС, параметров излучения (пространственных, спектральных, временных, модуляционных, поляризационных). Если излучение замаскировано, то создается неопределенность координат в пределах размеров элемента

разрешения средства РТР. Маскировка излучения РЛС может быть реализована применением активных шумовых радиопомех (ШП). Результат, достигаемый при реализации шумовой маскировки рабочего излучения РЛС – увеличение времени, требуемого на разведку РЛС, уменьшение пространственных зон разведки, ухудшение точностных характеристик разведки. Таким образом, маскировка излучения РЛС позволяет решить задачи противодействия обнаружению, идентификации и местоопределению РЛС средствами РТР.

*Имитация* излучения РЛС позволяет создавать для средств РТР противной стороны неопределенность количества РЛС данного типа в зоне разведки и неопределенность координат защищаемого РЛС. Достигаемый результат – отвлечение средств РТР и средств поражения РЛС (средств радиоэлектронного подавления, оружия, наводящегося на излучение РЛС) на «обслуживание» ложных РЛС.

*Искажение* излучения защищаемого РЛС направлена на создание неопределенности значений информационных параметров излучения защищаемого РЛС для средств РТР в некоторых окрестностях истинных значений этих параметров. Эффект от реализации радиоподавления искажающего типа заключается в увеличении ошибок измерения параметров излучения защищаемого РЛС (пространственных, спектральных, временных, модуляционных, поляризационных) средствами РТР. Как следствие, снижается достоверность идентификации РЛС, увеличиваются ошибки формирования целеуказаний и наведения средств поражения РЛС.

2. Для подавления средства РТР помехой маскирующего действия должно быть выполнено условие (2.1) (строгий критерий подавления) или условие (2.5) (упрощенный критерий подавления).

В случае реализации шумовой маскировки излучения защищаемого РЛС строгий критерий предполагает создание на входе приемника подавляемого средства РТР отношения ШП / (сигнал защищаемого РЛС) по мощности,

величина которого превышает заданное значение – коэффициент подавления. Упрощенный критерий предполагает создание ШП с плотностью потока мощности, превышающей плотность потока мощности излучения защищаемого РЛС в рассматриваемой точке в требуемое число раз, определяемое коэффициентом подавления.

Для использования упрощенного критерия подавления средства РТР применительно к любой рассматриваемой точке необходимо обеспечить отсутствие углового разрешения защищаемого РЛС и САП шумового прикрытия из этой точки средством РТР. Никакая другая информация о средстве РТР не требуется. В этом состоит важное преимущество упрощенного критерия подавления.

3. Результаты расчетов, представленные в виде графиков на рисунках 2.4 и 2.5, выполненных применительно к РЛС малой и средней дальности (индикаторные дальности соответственно 30 км и 250 км), указывают на очень высокие требования к энергетике САП шумового прикрытия РЛС. В ряде случаев требуемые уровни мощности САП представляются практически нереализуемыми. Это относится, прежде всего, к маскировке излучения защищаемого РЛС в пределах главного лепестка ДН антенны. Также нереализуемо высокими следует признать уровни мощности САП шумового прикрытия РЛС, требуемые для маскировки излучения РЛС в пределах нескольких первых боковых лепестков ДН антенны.

4. Показателями эффективности радиоподавления средств РТР, позволяющими судить о размерах и конфигурации пространственных зон, в пределах которых выполняются условия подавления средств РТР, могут быть «зональные показатели»: «зона подавления средства РТР (ЗП СРТР)», «зона маскировки излучения РЛС (ЗМИ РЛС)» и «зона действия САП (ЗД САП)» при защите РЛС. Эти показатели эффективности определяются по результатам полигонных испытаний с участием образцов техники РЛС, САП шумового прикрытия РЛС и средств РТР. Уменьшение затрат средств и времени,

требуемых для проведения испытаний, может быть обеспечено с использованием методов компьютерного имитационного моделирования. Математическое и программное обеспечение, необходимое для выполнения модельных экспериментов в части оценки зональных показателей, разработано в рамках данной диссертационной работы.

5. По результатам расчетов зон маскировки излучения защищаемых РЛС малой и средней дальности (индикаторные дальности соответственно 30 км и 250 км, параметры РЛС указаны в пунктах 2.2.2 и 2.2.3), выполненных с использованием разработанных в диссертации компьютерных расчетно-имитационных моделей, отраженных на рисунках 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, можно констатировать следующее. При установке на платформе защищаемого РЛС малой дальности двух САП шумового прикрытия мощностью 2 кВт каждое с угловым разносом ДН  $12^\circ$  ширина углового сектора, в котором обеспечивается маскировка бокового излучения РЛС, достигает  $348^\circ$ . Незамаскированной оказывается угловая зона боковых лепестков ДН антенны РЛС, не превышающая  $12 \theta_{\beta \text{ РЛС}}$  ( $\theta_{\beta \text{ РЛС}}$  – ширина главного лепестка ДН антенны РЛС по азимуту, составляющая для данного РЛС  $1^\circ$ ). Размещение на позиции РЛС малой дальности четырех САП шумового прикрытия с мощностью 1 кВт каждое, перекрывающих совместно  $360^\circ$  по азимуту, обеспечивает зону маскировки бокового излучения РЛС шириной  $344^\circ$ . Незамаскированным остается зондирующее и боковое излучение РЛС в угловом секторе примерно  $16^\circ$ , что составляет  $16 \theta_{\beta \text{ РЛС}}$ .

При размещении на платформе РЛС средней дальности действия двух САП мощностью 15 кВт каждое, антенны которых имеют ширину ДН  $\theta_{\beta \text{ САП}} = 60^\circ$  и пересекаются на направлении максимума главного лепестка ДН антенны РЛС на уровне 0,5 от максимального, обеспечивается зона маскировки бокового излучения РЛС шириной примерно  $322^\circ$ . Незамаскированным остается излучение защищаемого РЛС в секторе шириной  $38^\circ$ , то есть,  $17,3 \theta_{\beta \text{ РЛС}}$  (в данном случае  $\theta_{\beta \text{ РЛС}} = 2,2^\circ$ ). При

использовании для защиты РЛС средней дальности четырех САП мощностью 15 кВт, размещенных на позиции РЛС и перекрывающих совместно азимутальную зону  $360^\circ$ , обеспечивается маскировка бокового излучения РЛС в секторе  $312^\circ$ , соответственно незамаскированная зона составляет  $48^\circ$  ( $21,8 \theta_{\beta \text{ РЛС}}$ ).

6. При организации шумовой маскировки рабочего излучения РЛС возникает проблема обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) защищаемого РЛС и САП шумового прикрытия РЛС. Существуют три канала проникновения шума, излучаемого САП, в приемный тракт РЛС.

Первый канал – прямое проникновение ШП, излучаемой САП шумового прикрытия РЛС, в приемный тракт РЛС. Мощность паразитной шумовой наводки в приемном тракте РЛС зависит от уровней боковых лепестков ДН антенны САП и от усиления антенны РЛС в направлении САП, а также от расстояния между САП и РЛС.

Второй канал – переотражение ШП, излучаемой САП прикрытия РЛС, лоцируемым объектом (канал «переотражение ШП лоцируемым объектом»). Шум, отражаемый лоцируемым объектом («эхошум»), действует в приемном тракте РЛС вместе с полезным эхосигналом от объекта, вызывая ухудшение наблюдения объекта. Мощность «эхошума», зависит от энергопотенциала САП прикрытия и от ЭПР лоцируемого объекта в направлениях РЛС и САП.

Третий канал – переотражение ШП, излучаемой САП прикрытия РЛС, подстилающей поверхностью (канал «переотражение ШП подстилающей поверхностью»). Характеристики этого канала зависят от рельефа местности, электрических характеристик подстилающей поверхности, характера отражения (зеркальное, диффузное), поляризации поля ШП и др.

Для решения проблемы ЭМС защищаемого РЛС и САП прикрытия необходима разработка специальных мер, направленных на устранение (ослабление) влияния шума, излучаемого САП, на защищаемое РЛС.

7. В интересах защиты РЛС от средств РТР целесообразно, наряду со средствами шумового прикрытия РЛС, использовать средства имитации и искажения излучения РЛС, решающие задачи дезинформирования средств РТР. Дезинформирующее прикрытие РЛС может быть организовано путем создания средствам РТР радиопомех следующих видов:

а) Имитирующие помехи (ИмП) типа «Ложное зондирующее излучение с позиции защищаемого РЛС». Представляющими практический интерес вариантами таких ИмП могут быть помехи типов «Ложные частоты излучения РЛС» и «Ложные зондирующие сигналы РЛС». Средства создания таких ИмП могут размещаться в пределах позиции защищаемого РЛС, на платформе защищаемого РЛС или быть встроенными в РЛС. Такие помехи дезинформируют средства РТР относительно типов и параметров зондирующих сигналов защищаемого РЛС.

б) Имитирующая помеха типа «Ложная позиция защищаемого РЛС». Предполагается установка полномасштабного имитатора излучающей части защищаемого РЛС, включающего формирователь зондирующих сигналов, передающее устройство и антенну, на пространственной позиции, удаленной от РЛС. В качестве имитатора может использоваться, например, РЛС, однотипное с защищаемым РЛС, выработавшее свой ресурс или выведенное из эксплуатации, но имеющее исправные антенну и передающее устройство.

Эффект от создания ИмП типа «Ложная позиция защищаемого РЛС» заключается в создании неопределенности координат защищаемого РЛС.

в) Имитирующая помеха типа «Ложное зондирующее излучение РЛС с позиции, вынесенной за пределы позиции РЛС». Выдвижение имитатора излучения РЛС в направлении зоны расположения средств РТР позволяет снизить требования к мощности САП имитации. Относительно маломощный имитатор излучения РЛС может быть размещен на малых объектах, например, на беспилотных ЛА (БЛА). Техническая реализация САП имитации излучения РЛС возможна на базе ретранслятора, приемная антенна которого

ориентируется в направлении защищаемого РЛС, а передающая антенна – в направлении зоны возможного расположения средств РТР противной стороны.

Эффект от создания ИмП типа «Ложное зондирующее излучение РЛС с позиций, вынесенных за пределы позиции РЛС» заключается в отвлечении временного и технического ресурса средств разведки и поражения противной стороны на «обслуживание» ложных излучателей.

г) Искажающие помехи типов «Искажение огибающей зондирующего импульса РЛС», «Искажение соотношений амплитуд, фаз и моментов действия сигналов РЛС на выходах антенн пеленгатора РТР», и другие Действие ИсП приводит к увеличению ошибок измерения параметров этого излучения измерителями из состава средства РТР. Средства создания ИсП размещаются на платформе или на позиции защищаемого РЛС.

### **3 Технически реализуемые предложения по организации радиоподавления средств РТР в интересах защиты РЛС**

Рассмотрение, проведенное в разделе 2 настоящей работы, позволило выявить возможности организации защиты РЛС от средств РТР, основанные на методах радиоподавления. Эти возможности с учетом объективных трудностей, возникающих при их реализации, могут быть использованы как основа при разработке технически реализуемых предложений по организации радиоподавления средств РТР в интересах защиты РЛС. Ниже рассматриваются существующие трудности, возможные пути их преодоления, а также предложения по организации защиты РЛС от средств РТР, изложенные в работе автора [76] в соавторстве с Юдиным В.Н.

#### **3.1 Трудности, возникающие при организации активного радиоподавления РЛС и возможные пути их преодоления**

Из проведенного выше (в п. 2.2.2, 2.2.3) анализа результатов расчетов требуемых уровней мощности САП шумового прикрытия РЛС, а также получаемых конфигураций зональных показателей эффективности радиоподавления средств РТР следует, что реализация шумовой маскировки рабочего излучения защищаемого РЛС, как правило, сопряжена с весьма значительными трудностями. Основные трудности состоят в следующем.

*Во-первых*, для обеспечения возможностей шумовой маскировки, а также имитации и искажения зондирующего излучения защищаемого РЛС (излучения в пределах углового сектора главного лепестка ДН антенны), потребуются САП с очень высокими уровнями энергопотенциала (на уровне энергопотенциала защищаемого РЛС, который в случае РЛС обнаружения ВЦ и многофункциональных РЛС может достигать  $(10^8 \dots 10^9)$  Вт и более.

*Во-вторых*, при решении задач шумовой маскировки, имитации и искажения бокового излучения защищаемого РЛС также требуются САП с

высокими уровнями мощности, что подтверждается результатами расчетов, представленными выше. В наибольшей степени это справедливо применительно к следующим случаям:

- активному прикрытию подлежит излучение РЛС в угловых секторах, соответствующих ближним боковым лепесткам ДН антенны РЛС;

- активное прикрытие РЛС должно быть заградительным по угловым направлениям (в широком секторе боковых лепестков ДН защищаемого РЛС) или (и) по частоте.

*В-третьих*, при решении задач шумовой маскировки излучения защищаемого РЛС неизбежно возникает необходимость обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) этого РЛС и САП шумового прикрытия, поскольку излучение САП может воздействовать на приемный тракт защищаемого РЛС по каналу прямого прохождения «САП – РЛС», а также по каналам переотражения «САП – подстилающая поверхность – РЛС».

*В-четвертых*, аддитивное взаимодействие излучения САП шумовой маскировки, отражаемого от лоцируемых объектов («эхошум»), и эхосигналов зондирующего излучения защищаемого РЛС на входе приемного тракта РЛС неизбежно приводит к уменьшению дальности радиолокационного наблюдения РЛС («сжатую» зоны видимости РЛС).

Преодоление указанных трудностей технически сложно. Тем не менее, существуют подходы, на базе которых возможно снижение остроты обсуждаемой проблемы, а также разработка технически реализуемых предложений по организации маскировки, имитации и искажения излучения РЛС и построению радиолокационно-помехового комплекса, обладающего повышенной защищенностью от средств РТР. Некоторые из этих подходов рассматриваются далее.

***Снижение требований к мощности САП прикрытия РЛС*** возможно осуществить следующими путями:

*1. Использование в составе САП прикрытия РЛС антенн с высокими коэффициентами усиления.* Этот подход основан на том, что угловые направления на воздушные средства РТР, ведущие разведку защищаемого РЛС, могут быть известны на стороне защищаемого РЛС. Исходные предпосылки для такого утверждения следующие. В условиях реального эпизода преодоления ПВО каждая ВЦ, наблюдаемая защищаемым РЛС, может быть носителем средства РТР. Присутствие в контролируемой зоне ВЦ, на борту которых нет средств РТР, в настоящее время маловероятно. Таким образом, направления на средства РТР, присутствующие в контролируемой зоне, совпадают с направлениями на ВЦ, обнаруженные и сопровождаемые защищаемым РЛС по угловым координатам и по дальности. Это обстоятельство может быть использовано для организации прикрытия излучения РЛС от средств РТР прицельно по угловым направлениям на сопровождаемые ВЦ. А именно, излучения САП прикрытия РЛС могут формироваться в направлениях ВЦ, обнаруженных и сопровождаемых РЛС.

При реализации радиоподавления СРТР, прицельного по направлению, антенна САП ориентируется в направлении ВЦ, сопровождаемых защищаемым РЛС. Применение направленной антенны позволяет снизить требования к мощности САП прикрытия РЛС.

*Недостаток* обсуждаемого подхода состоит в том, что не все ВЦ, реально присутствующие в зоне, контролируемой защищаемым РЛС, могут обнаруживаться и сопровождаться этим РЛС на дальностях, представляющих интерес с точки зрения рассматриваемых здесь задач защиты от средств РТР. Сказанное характерно, прежде всего, для ВЦ со сниженной радиолокационной заметностью, таких, как самолеты F-22, F-35 и другие.

Поскольку малозаметные ВЦ являются приоритетными для РЛС, обсуждаемый вариант снижения требований к мощности САП прикрытия РЛС следует считать малоперспективным.

2. *Выдвижение САП шумового прикрытия РЛС в направлении зоны расположения средств РТР.* Как следует из результатов расчетов, приведенных в п. 2.2.2 (смотри рисунки 2.4 и 2.5), существенное уменьшение требуемой мощности САП шумового прикрытия РЛС может быть обеспечено за счет сокращения расстояния между САП и подавляемыми средствами РТР. Следовательно, целесообразно выдвижение САП шумового прикрытия РЛС в «разведопасные» направления.

Если направление на подавляемое средство РТР известно, то позицию САП прикрытия следует располагать на прямой, соединяющей РЛС и подавляемое средство РТР (смотри рисунок 3.1). При этом, чем ближе к средству РТР расположено САП, тем лучше достигаемый результат по снижению требуемой мощности САП.

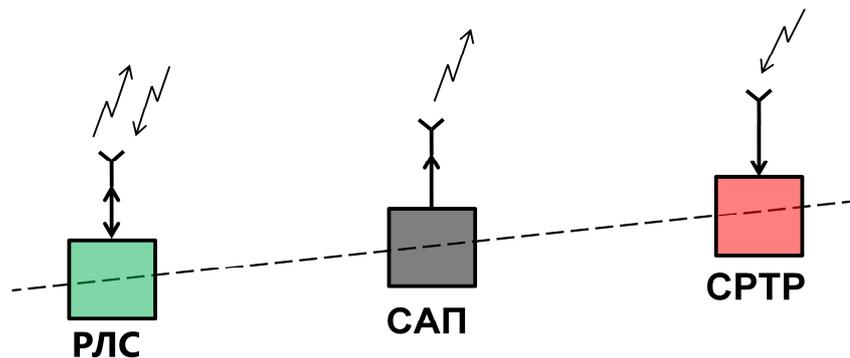


Рисунок 3.1 - Расположение САП прикрытия на прямой

Возможны два варианта реализации такого подхода.

Первый вариант предполагает использование радиолокационной информации об угловом положении ВЦ – носителей средств РТР противной стороны, получаемой от защищаемого РЛС.

Недостаток такого способа, делающий его неперспективным, состоит в том, что он не позволяет обеспечить защиту РЛС от средств РТР, носители которых, не наблюдаются защищаемым РЛС. Такими носителями средств РТР

могут быть малозаметные ВЦ, а также низколетящие ВЦ. Кроме того, даже если носитель средства РТР наблюдается защищаемым РЛС, для выдвижения САП в соответствующем направлении потребуется время, которое может оказаться неприемлемо большим.

Второй вариант предполагает размещение на местности на рубеже между защищаемым РЛС и предполагаемой зоной присутствия средств РТР противной стороны некоторого числа САП прикрытия, перекрывающих в совокупности весь «разведопасный» сектор) (рисунок 3.2). Расстояние между САП выбирается из условия отсутствия углового разрешения защищаемого РЛС и любого из САП средством РТР располагающимся за рубежом САП.

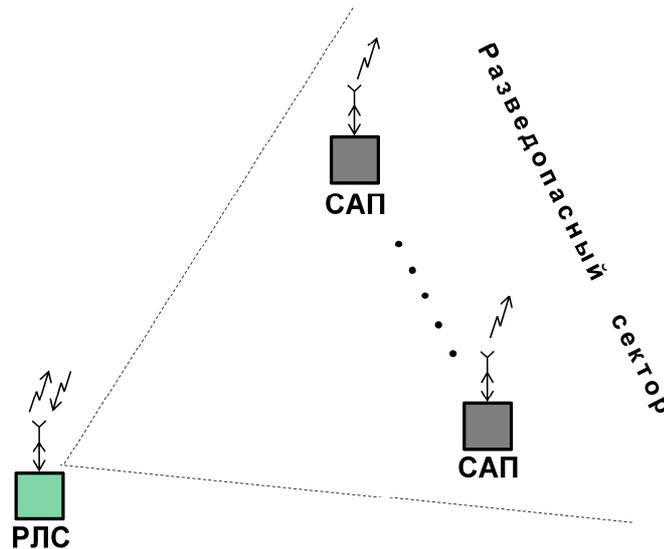


Рисунок 3.2 - «Разведопасный» сектор

Недостатком такого способа является относительная сложность его реализации при необходимости размещения большого числа САП прикрытия в «разведопасном» секторе.

3. *Использование САП шумового прикрытия РЛС, встроенного в антенно-передающий тракт РЛС.* Идея этого подхода основана на том, что САП шумового прикрытия может использовать общие с защищаемым РЛС передающий тракт и антенну. При этом появляется возможность

использования основной антенны и усилительного тракта передатчика РЛС не только для излучения зондирующих сигналов, но также в интересах шумового прикрытия этого РЛС [76]. Реализация такого подхода поясняется схемой, представленной на рисунке 3.3, где обозначено: ФЗС – формирователь зондирующего сигнала; ФМШ – формирователь маскирующего шума; Упр – управление; Сум – суммирование; Ус – усиление; ППП – переключатель «прием-передача»; Пр – приемник; ЗС – зондирующий сигнал; ЭС – эхосигнал; ЭШ – «эхошум»; МШ – маскирующий шум;  $A_{РЛС}$  – антенна РЛС.

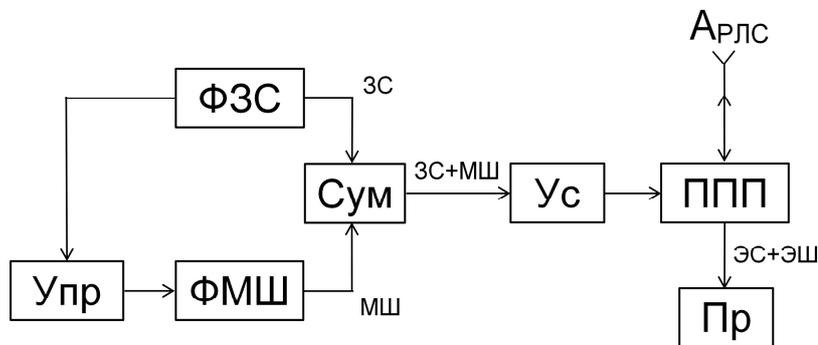


Рисунок 3.3 - Функциональная схема антенно-передающего тракта РЛС со встроенным САП

Формирование зондирующих сигналов РЛС выполняется обычным для защищаемого РЛС способом, при этом на выходе ФЗС могут быть сигналы в виде одиночных радиоимпульсов или пачек импульсов с любыми видами внутриимпульсной модуляции (немодулированные, ЛЧМ, ФКМ). Эти сигналы суммируются с шумом, реализации которого поступают с выхода ФМШ. Сумма реализаций зондирующих сигналов и шума с выхода сумматора усиливается и через ППП поступает в антенну  $A_{РЛС}$ . Таким образом, рабочее излучение РЛС представляет собой аддитивную смесь «ЗС+МШ», иначе говоря, это зондирующие сигналы, замаскированные шумом. Параметры смеси «ЗС+МШ» должны быть подобраны так, чтобы

защищаемое РЛС могло наблюдать эхосигналы от лоцируемых объектов, при этом разведка ЗС средством РТР на фоне МШ невозможна. Выполнение этого условия может быть обеспечено при достаточно большом значении базы ЗС. Ясно, что наличие МШ неизбежно приведет к уменьшению дальности радиолокационного наблюдения. Однако величина базы ЗС может быть подобрана так, что уменьшение дальности не превышает допустимого уровня. Вопросы выбора значения базы, а также обеспечения электромагнитной совместимости РЛС и средств генерации МШ, рассмотрены ниже.

Преимущество рассматриваемого подхода, предполагающего использование средств шумовой маскировки ЗС, встроенных в РЛС по схеме, представленной на рисунке 3.3, состоит в следующем. Поскольку ЗС и МШ излучаются одной передающей антенной, они усиливаются одинаково. При этом выполнение условия маскировки ЗС, обеспечиваемое подбором соотношения мощностей ЗС и МШ перед их суммированием в передающем тракте РЛС, сохраняется в направлениях как боковых, так и главного лепестка ДН антенны РЛС. Таким образом, обсуждаемый подход позволяет реализовать шумовую маскировку как бокового, так и главного (зондирующего) излучения защищаемого РЛС.

С учетом сказанного, следует считать рассматриваемый способ организации шумового прикрития РЛС, основанный на встраивании САП в антенно-передающий тракт РЛС, перспективным. Его реализация возможна как в новых разработках РЛС, так и при модернизации существующих разработок.

Недостаток рассматриваемого подхода состоит в том, что он не обеспечивает создание неопределенности (скрытие) углового направления на защищаемое РЛС, а также скрытие точки стояния РЛС для средств пассивной локации угломерного типа из состава средств РТР.

**Обеспечение электромагнитной совместимости защищаемого РЛС и САП прикрытия** возможно путем реализации следующих мер

1. *Формирование шума, маскирующего или (и) искажающего излучение защищаемого РЛС, прицельно по времени излучения РЛС.* Шумовая маскировка излучения РЛС может быть реализована путем излучения не непрерывного во времени шума, а отрезков шума («шумовых импульсов»), перекрывающих по времени импульсы излучения защищаемого РЛС. При этом каждый шумовой импульс маскирует соответствующий импульс (или группу импульсов) излучения РЛС.

Достоинство прицельной по времени шумовой маскировки излучения РЛС состоит в том, что она позволяет решить проблему обеспечения ЭМС защищаемого РЛС и САП шумового прикрытия этого РЛС по каналу прямого прохождения «САП – РЛС». Обеспечение ЭМС достигается за счет того, что шум, излучаемый с позиции САП в виде шумовых импульсов, длительность которых близка к длительности ЗИ, может затруднять прием эхосигналов только от тех ВЦ, которые расположены на одинаковых с САП расстояниях от РЛС, и не мешает приему эхосигналов, поступающих с других дальностей. Существенно, что помехи приему эхосигналов от ВЦ полностью отсутствуют, если САП расположено в пределах «мертвой зоны» защищаемого РЛС. С учетом этого обстоятельства, с точки зрения обеспечения ЭМС защищаемого РЛС и САП наиболее выгодным следует считать размещение САП, встроенное в РЛС, или в непосредственной близости от РЛС (на позиции РЛС).

Прицельная по времени шумовая маскировка излучения РЛС может быть реализована путем формирования шумовых импульсов «накрывающего» или «ответного» типов. Рассмотрим эти варианты отдельно.

*Вариант 1. Маскировка излучения РЛС шумовыми импульсами «накрывающего» типа.* Сущность способа поясняется на рисунке 3.4, где обозначено: ИРИ – импульс рабочего излучения (зондирующего или бокового) РЛС; ШИ – шумовой импульс;  $t_{ш.нач}$  и  $t_{ш.кон}$  – моменты начала

(передний фронт) и конца (задний фронт) шумового импульса;  $\tau_{\text{ШИ}}$  – длительность шумового импульса;  $\tau_{\text{упр}}$  – временное упреждение переднего фронта ШИ относительно переднего фронта ИРИ.

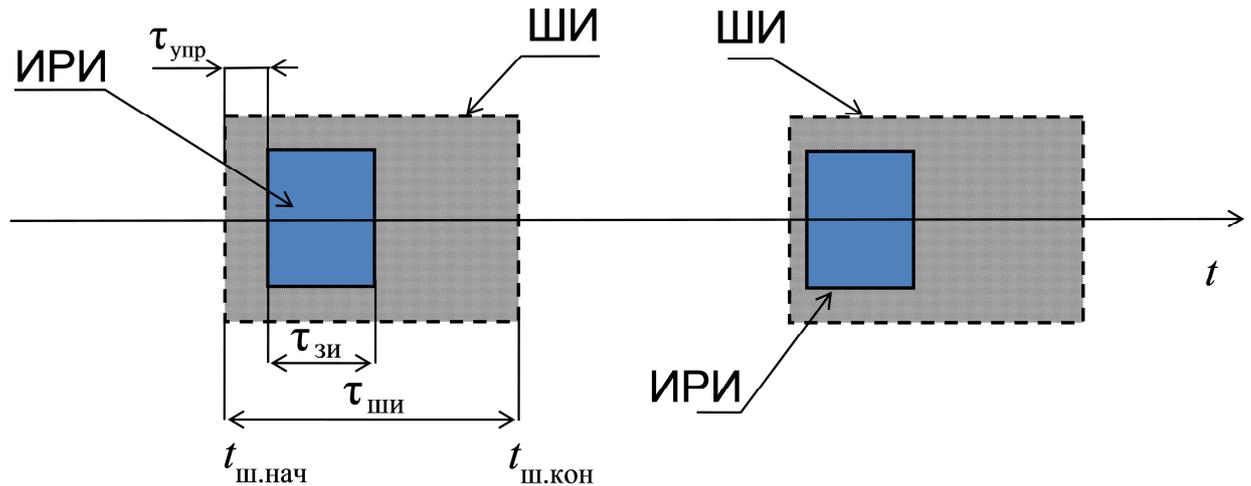


Рисунок 3.4 - Шумовые импульсы накрывающего типа

Каждый шумовой импульс «накрывает» во времени соответствующий импульс рабочего излучения защищаемого РЛС, распространяющийся в зоне расположения средств РТР.

Если мощность шума на входе приемных устройств средств РТР настолько велика, что выполняется условие подавления (2.1) или (2.5), то при маскировке ИРИ РЛС накрывающими шумовыми импульсами для средств обнаружения и измерения параметров сигналов из состава средств РТР обеспечивается создание неопределенности (повышение уровня скрытности) факта присутствия каждого ИРИ, а также значений его энергетических параметров и параметров модуляции (амплитуда импульса, тип и параметры внутриимпульсной модуляции). Создание неопределенности значений временных параметров ИРИ и последовательностей ИРИ (моменты прихода, длительности импульсов, межимпульсные интервалы, период повторения импульсов) обеспечивается при достаточной длительности «накрывающих»

шумовых импульсов за счет наличия временного упреждения  $\tau_{упр}$ , а также за счет наличия перестройки величин  $\tau_{упр}$  и  $\tau_{ШИ}$  по труднопредсказуемому закону. Скрытие частотных параметров ИРИ (несущие частоты, ширина и форма спектров импульсов) может быть обеспечено при достаточной ширине спектра шумовых импульсов, а также за счет расстройки несущих частот шумовых импульсов и ИРИ РЛС, изменяемой от импульса к импульсу по труднопредсказуемому закону. Скрытие пространственного параметра – углового направления на защищаемое РЛС с позиции средства РТР обеспечивается в пределах углового элемента разрешения пеленгатора средства РТР (если угловой разнос САП и РЛС, наблюдаемый с позиции средства РТР, не превышает величины углового разрешения пеленгатора средства РТР).

*Вариант 2. Маскировка рабочего излучения РЛС шумовыми импульсами «ответного» типа.* Сущность способа поясняется на рисунке 3.5, где обозначено: ИРИ – импульс рабочего излучения РЛС; ШИ – шумовой импульс;  $t_{ш.нач}$  и  $t_{ш.кон}$  – моменты начала (передний фронт) и конца (задний фронт) шумового импульса;  $\tau_{ШИ} = t_{ш.кон} - t_{ш.нач}$  – длительность шумового импульса;  $\tau_{ш. зад}$  – временная задержка переднего фронта шумового импульса относительно переднего фронта маскируемого ИРИ РЛС.

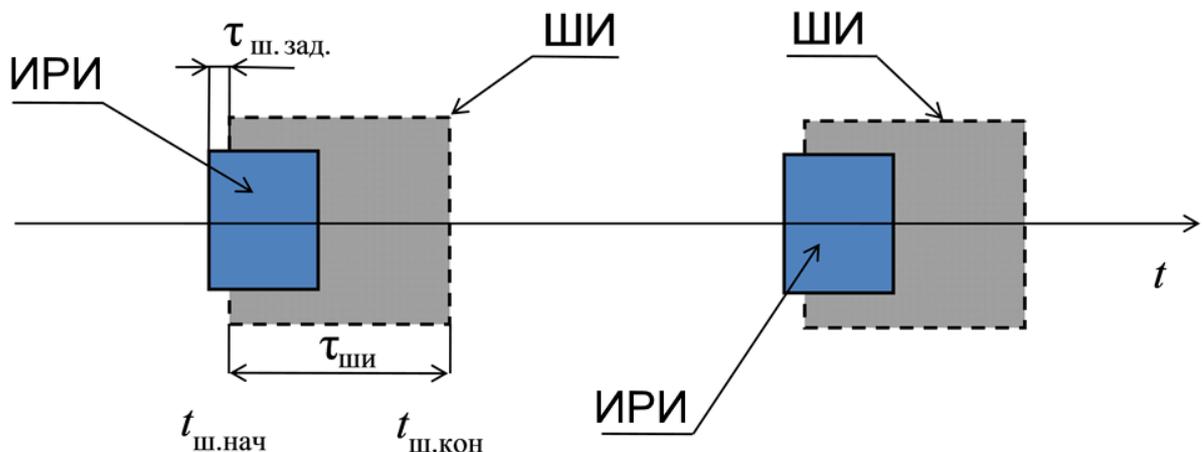


Рисунок 3.5 - Шумовые импульсы ответного типа

В отличие от предыдущего случая, момент начала шумового импульса  $t_{ш.нач}$  запаздывает относительно момента переднего фронта ИРИ на величину  $\tau_{ш. зад}$ . Каждый шумовой импульс излучается с позиции САП как «ответ» на ИРИ защищаемого РЛС, принятый на этой позиции, при этом величина  $\tau_{ш. зад}$  — это т. н. «задержка ответа». За счет наличия задержки ответа часть ИРИ в области его переднего фронта, длительность которой соответствует величине  $\tau_{ш. зад}$ , оказывается незамаскированной шумом.

Уровни неопределенности (скрытности) значений параметров ИРИ для средств обнаружения и измерения параметров сигналов из состава средства РТР, создаваемые при маскировке ИРИ РЛС ответными шумовыми импульсами, зависят от величины  $\tau_{ш. зад}$ .

Если величина  $\tau_{ш. зад}$  настолько мала, что обнаружитель сигналов, имеющийся в составе средства РТР, не разрешает ИРИ РЛС и шумовой импульс, (не обнаруживает ИРИ по его незамаскированной части), то при маскировке ИРИ РЛС ответными шумовыми импульсами, как и в случае маскировки накрывающими шумовыми импульсами, для средств обнаружения сигналов и измерения параметров из состава средства РТР обеспечивается создание неопределенности факта присутствия каждого ИРИ, а также значений его энергетических, спектральных и пространственных параметров. Что касается временных параметров ИРИ защищаемого РЛС, то создание неопределенности значений этих параметров в полной мере (как в случае реализации маскировки с применением непрерывного шума или накрывающих шумовых импульсов), не обеспечивается. А именно, для соответствующих измерителей из состава средства РТР не обеспечивается создание неопределенности значений таких временных параметров, как моменты прихода импульсов, межимпульсные интервалы, период повторения импульсов. Эти параметры могут быть определены подавляемым средством РТР по результатам измерения моментов передних фронтов ответных шумовых импульсов. Однако при достаточной величине  $\tau_{ши}$  и при наличии

перестройки этой величины по труднопредсказуемому закону обеспечивается создание неопределенности длительности ИРИ защищаемого РЛС.

*2. Формирование шума, маскирующего или (и) искажающего излучение защищаемого РЛС, со сдвигом по частоте относительно излучения РЛС.* Разнос по частоте излучений САП и защищаемого РЛС позволяет улучшить условия их электромагнитной совместимости как по каналу прямого прохождения «САП – РЛС», так и по каналам переотражения «САП – подстилающая поверхность – РЛС». При этом существенно, что маскирующая (искажающая) способность излучения САП из-за наличия частотного разнеса излучений САП и РЛС может не ухудшиться. Причина этого заключается в том, средства РТР, как правило, обладают относительно низкой разрешающей способностью по частоте.

***Уменьшение влияния шума, маскирующего излучение защищаемого РЛС, на дальность радиолокационного наблюдения возможно путем реализации следующих мер:***

*1. Использование в защищаемом РЛС зондирующих сигналов с увеличенными значениями базы.* Сигнал, отражаемый лоцируемым объектом, представляет собой аддитивную смесь «эхосигнал + эхошум» (ЭС + ЭШ). Этот сигнал подвергается в приемном тракте РЛС обработке в фильтре, согласованном с зондирующим импульсом РЛС. Результатом согласованной фильтрации является «сжатие» эхоимпульса по времени и увеличение отношения ЭС/ЭШ. Для идеального согласованного фильтра это увеличение составляет

$$B_{\text{и}} = \tau_{\text{и}} \Delta f_{\text{и}}$$

раз, где  $\tau_{\text{и}}$  – длительность, а  $\Delta f_{\text{и}}$  – ширина спектра исходного (несжатого) импульса;  $B_{\text{и}}$  – база импульса. Таким образом, эхоимпульс, замаскированный шумом, создаваемым САП прикрытия РЛС, может наблюдаться на выходе согласованного приемного тракта защищаемого РЛС при достаточно большом значении базы.

2. *Формирование шума, маскирующего (искажающего) излучение защищаемого РЛС, со сдвигом по частоте относительно излучения РЛС.* Этот подход совпадает с таковым, описанным выше в п.5. При наличии достаточной частотной расстройки маскирующего шума, создаваемого САП, и зондирующего сигнала РЛС, влияние шума на дальность радиолокационного наблюдения устраняется.

На базе сформулированных выше подходов возможна разработка технически реализуемых предложений по организации радиоподавления средств РТР в интересах защиты РЛС. Далее по тексту рассмотрены такие предложения.

## 3.2 Шумовая маскировка излучения РЛС на базе САП, встроенного в антенно-передающий тракт РЛС

### 3.2.1 Сущность и параметры предлагаемого способа защиты РЛС

Шумовое прикрытие РЛС выполняется с помощью САП, являющегося неотъемлемой частью антенного и передающего устройств защищаемого РЛС (встроенного в антенно-передающий тракт РЛС). Идея способа изложена выше (раздел 3.1, поясняющий рисунок 3.3).

При реализации обсуждаемого способа защиты РЛС рабочее излучение РЛС на отрезке времени, соответствующем излучению текущего зондирующего импульса (ЗИ), представляет собой аддитивную смесь ЗИ и реализации шума («шумового импульса» (ШИ)), маскирующей этот ЗИ.

Момент  $t_{\text{ш.нач}}$  переднего фронта ШИ может совпадать с моментом переднего фронта ЗИ (рисунок 3.6). В этом варианте генератор шума, имеющийся в составе ФМШ (рисунок 3.3), запускается передним фронтом ЗИ. На рисунке обозначено:  $\tau_{\text{зи}}$  длительность зондирующего импульса РЛС;  $\tau_{\text{ши}}$  – длительность импульса МШ.

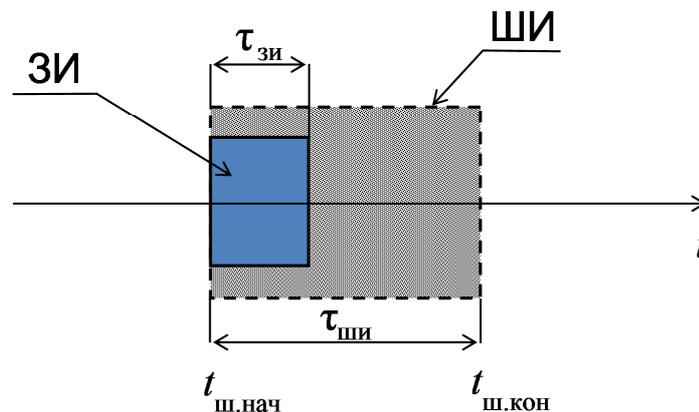


Рисунок 3.6 - Излучение ШИ начинается одновременно с ЗИ

В другом варианте излучение ШИ начинается с некоторым упреждением  $\tau_{упр}$  по отношению к переднему фронту ЗИ (рисунок 3.7).

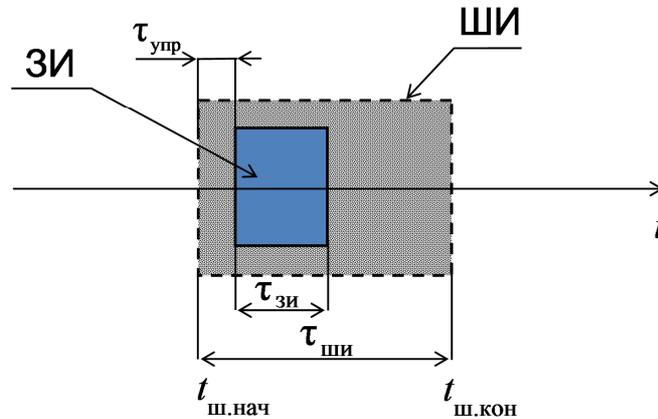


Рисунок 3.7 - Излучение ШИ начинается с некоторым упреждением ЗИ

Случай  $\tau_{упр} \neq 0$ , согласно материалу п.4 раздела 3.1, соответствует шумовой маскировке «накрывающего типа». Момент  $t_{ш.кон}$  окончания ШИ всегда запаздывает относительно заднего фронта ЗИ, при этом длительность шумового импульса  $\tau_{ШИ} = t_{ш.кон} - t_{ш.нач} > \tau_{ЗИ}$ . Величина этого запаздывания определяет радиус  $R_{м.з}$  «расширенной мертвой зоны» защищаемого РЛС согласно соотношению

$$R_{м.з} = \frac{c (\tau_{ШИ} - \tau_{упр})}{2},$$

где  $c$  - скорость распространения радиоволн.

Моменты  $t_{ш.нач}$  и  $t_{ш.кон}$  необходимо рандомизировать. Рандомизация обеспечивает создание неопределенности (скрытие от средств РТР) временных параметров зондирующего излучения защищаемого РЛС, таких, как длительность и период повторения ЗИ. При определении моментов  $t_{ш.нач}$  и  $t_{ш.кон}$  возможно обращение к генераторам случайных чисел.

Энергетический спектр маскирующего шума, в общем случае, должен перекрывать ту часть спектра ЗИ, в которой сосредоточена основная часть

мощности ЗИ. Примерное соотношение спектра ЗИ и энергетического спектра ШИ показано на рисунке 3.8.

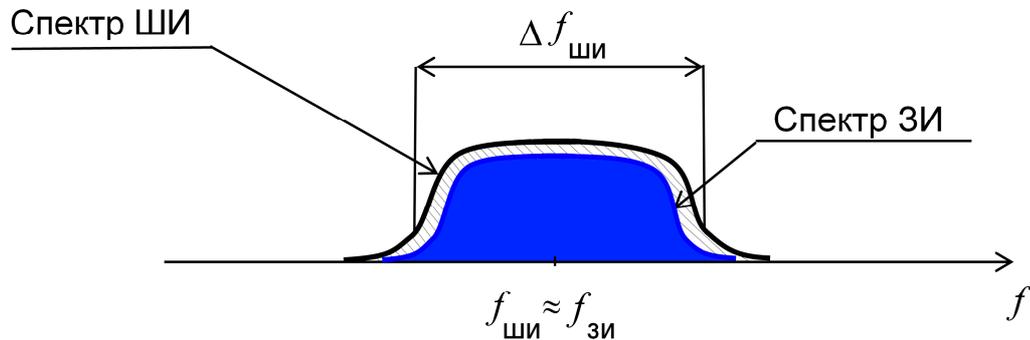


Рисунок 3.8 - Соотношение энергетических спектров ЗИ и ШИ

На рисунке 3.8 обозначено:  $f_{\text{ШИ}}$  и  $f_{\text{ЗИ}}$  - центральные частоты спектров ШИ и ЗИ;  $\Delta f_{\text{ШИ}}$  - ширина спектра ШИ. Частоты  $f_{\text{ШИ}}$  и  $f_{\text{ЗИ}}$  совпадают или близки.

В частном случае, когда на стороне защищаемого РЛС известно, что частотное разрешение  $\delta_{f \text{ РТР}}$  аппаратуры частотного анализа средств РТР противной стороны невысокое ( $\delta_{f \text{ РТР}} \gg \Delta f_{\text{ШИ}}$ ), центральная частота  $f_{\text{ШИ}}$  спектра ШИ может быть сдвинута относительно частоты  $f_{\text{ЗИ}}$  на некоторую величину  $\Delta f_{\text{ШИ-ЗИ}}$  (рисунок 3.9).

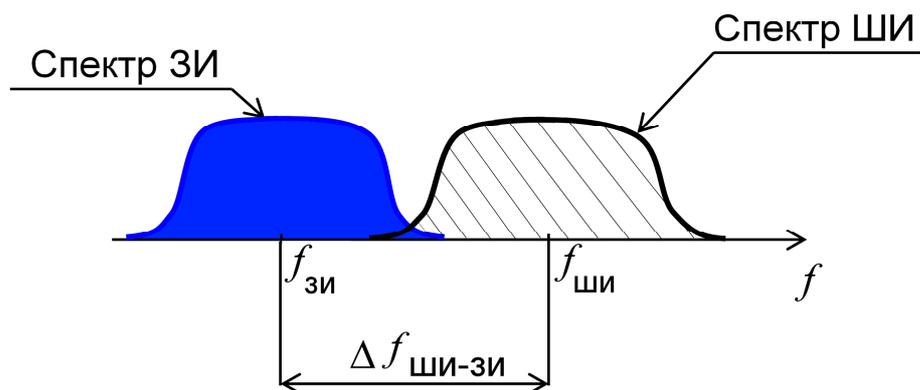


Рисунок 3.9 - Сдвиг ШИ относительно ЗИ по частоте

Выбор частотного сдвига  $\Delta f_{\text{ШИ-ЗИ}}$  должен гарантировать отсутствия частотного разрешения ШИ и ЗИ средством РТР. Как отмечается в

разделе 3.1, наличие частотного зазора между ШИ и ЗИ способствует улучшению ЭМС защищаемого РЛС и САП шумового прикрития.

Важным параметром рассматриваемого способа является отношение

$$q_{\text{ШИ/ЗИ}}^2 = \frac{P_{\text{ШИ}}}{P_{\text{ЗИ}}}$$

мощностей  $P_{\text{ШИ}}$  и  $P_{\text{ЗИ}}$  шумового и зондирующего импульсов которое должно быть установлено в передающем тракте защищаемого РЛС при формировании рабочего излучения, представляющего собой смесь «ЗИ+ШИ» (смотри рисунок 3.3). Величина  $q_{\text{ШИ/ЗИ}}^2$  должна обеспечивать требуемые значения вероятностей правильного обнаружения ( $D_{\text{РТР}}$ ) и ложной тревоги ( $F_{\text{РТР}}$ ) при обнаружении ЗИ в приемном тракте подавляемого средства РТР.

Требуемая вероятность правильного обнаружения  $D_{\text{РТР}}$  (при фиксированной вероятности ложной тревоги  $F_{\text{РТР}}$ ) обеспечивается, если величина  $q_{\text{ШИ/ЗИ}}^2$  отвечает известному соотношению, определяющему так называемый «коэффициент подавления» [52] приемного тракта  $K_{\text{под}}(D_{\text{РТР}}, F_{\text{РТР}})$ . Для случая обнаружения одиночного импульса в приемном тракте, согласованном с этим импульсом, указанное соотношение имеет вид [78]

$$K_{\text{под}}(D_{\text{РТР}}, F_{\text{РТР}}) = q_{\text{ШИ/ЗИ}}^2(D_{\text{РТР}}, F_{\text{РТР}}) = \frac{2 B_{\text{и}}}{q_{\text{ввых}}^2(D_{\text{РТР}}, F_{\text{РТР}}) K_{\text{пот}} K_{\text{кач}}}, \quad (3.1)$$

где  $B_{\text{и}}$  – база обнаруживаемого ЗИ;  $q_{\text{ввых}}^2(D_{\text{РТР}}, F_{\text{РТР}})$  – величина отношения «ЗИ/ШИ» по мощности на выходе приемного тракта средства РТР (на входе обнаружителя), при которой обеспечиваются вероятности  $D_{\text{РТР}}$  и  $F_{\text{РТР}}$ ;  $K_{\text{пот}}$  – коэффициент потерь за счет отличия приемного тракта от согласованного фильтра;  $K_{\text{кач}}$  – коэффициент качества шума, маскирующего ЗИ, зависящий от формы его спектральной плотности мощности.

Будем исходить из предположения, средству РТР известны сигналы, излучаемые защищаемым РЛС, соответственно, в его составе имеется фильтр, согласованный с зондирующим импульсом РЛС. Такое предположение с точки зрения защищаемого РЛС является наименее благоприятным. В этом

случае искомая величина  $q_{\text{Вых}}^2(D_{\text{РТР}}, F_{\text{РТР}})$  может быть определена с использованием стандартных характеристик обнаружения, содержащихся, например, в [71], по заданным вероятностям  $D_{\text{РТР}}, F_{\text{РТР}}$ . При этом фигурирующие в (3.1) величины базы  $V_{\text{и}}$  обнаруживаемого импульса и коэффициента потерь  $K_{\text{пот}}$  могут быть приняты равными единице. При выборе значения коэффициента качества шума, маскирующего ЗИ, предположим, что спектральная плотность мощности этого шума равномерная. При таком предположении можно принять  $K_{\text{кач}} = 1$ .

Для оценки вероятности обнаружения разведываемых импульсов целесообразно использовать методики, разработанные применительно к РЛС, с учетом специфики РТР, имеющей дело, как правило, не с отраженными, а достаточно мощными прямыми сигналами [44].

Представляет интерес рассмотреть случай, когда вероятности правильного обнаружения  $D$  и ложной тревоги  $F$  обнаружителя связаны известным соотношением:

$$D = F^{1 + \frac{1}{2} q_{\text{Вых}}^2}, \quad (3.2)$$

которое справедливо при медленных флуктуациях амплитуды обнаруживаемых импульсов [71]. Соотношение (3.2) применимо в случае если длительность обнаруживаемого импульса не превышает время радиоконтакта РЛС и средства РТР, при котором положение ДН антенны РЛС не изменяется. На основе (3.1) и (3.2) легко получить соотношение, связывающее величину  $q_{\text{ШИ/ЗИ}}^2(D_{\text{РТР}}, F_{\text{РТР}})$  с вероятностями  $D_{\text{РТР}}, F_{\text{РТР}}$ . Оно имеет вид:

$$q_{\text{ШИ/ЗИ}}^2(D_{\text{РТР}}, F_{\text{РТР}}) = \frac{\lg D_{\text{РТР}}}{\lg F_{\text{РТР}} - \lg D_{\text{РТР}}}. \quad (3.3)$$

Результаты расчетов по формуле (3.3) представлены в виде семейства графиков на рисунке 3.10.

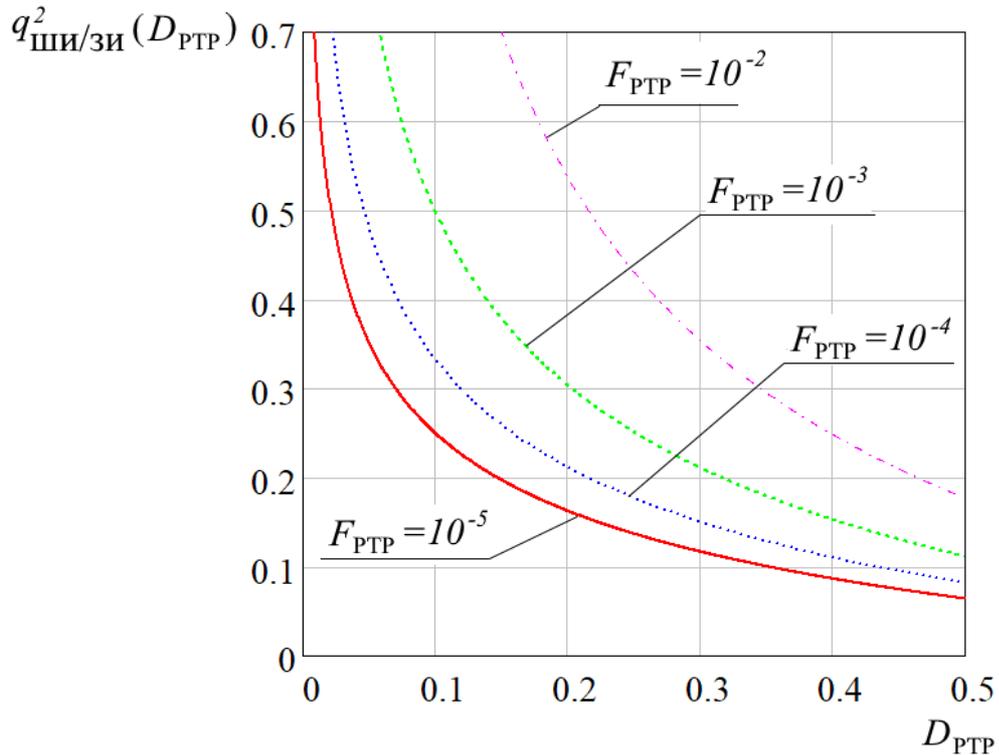


Рисунок 3.10 - Зависимость отношения  $q^2_{ШИ/ЗИ}$  от  $D_{РТР}$  при различных значениях  $F_{РТР}$

Анализ результатов расчетов показывает, что величина  $q^2_{ШИ/ЗИ}$ , достаточная для качественной маскировки зондирующего импульса, излучаемого защищаемым РЛС, может быть относительно небольшой. Так, если  $q^2_{ШИ/ЗИ} = 1$ , то вероятность правильного обнаружения ЗИ на фоне ШИ в приемном тракте средства РТР при вероятности ложной тревоги  $F_{РТР} = 10^{-4}$  составляет  $D_{РТР} = 0,01$ . Также при  $q^2_{ШИ/ЗИ} = 0,5; 0,3; 0,2$  для  $F_{РТР} = 10^{-4}$  имеем соответственно  $D_{РТР} = 0,05; 0,12; 0,22$ , для  $F_{РТР} = 10^{-3}$  соответственно  $D_{РТР} = 0,1; 0,2; 0,32$ . С учетом этого можно предположить, что импульсы маскирующего шума могут не оказывать значительного влияния на дальность радиолокационного наблюдения. Ниже этот вопрос рассмотрен более подробно.

### 3.2.2 Оценка влияния шума, маскирующего излучение РЛС, на дальность радиолокации

Условие радиолокационного наблюдения ВЦ при использовании шумовой маскировки излучения РЛС имеет вид:

$$\frac{P_{ЭС\text{ вх}}}{P_{ЭШ\text{ вх}} + P_{СШ\text{ вх}}} \geq K_{\text{разл}}(\text{ПК}_{\text{РЛ}}), \quad (3.4)$$

где  $P_{ЭС\text{ вх}}$  и  $P_{ЭШ\text{ вх}}$  – мощность эхосигнала (ЗИ, отраженного от ВЦ) и мощность эхошума (ШИ, отраженного от ВЦ) на входе приемного тракта РЛС;  $P_{СШ\text{ вх}}$  – мощность собственного шума приемника РЛС, приведенная к его входу;  $K_{\text{разл}}(\text{ПК}_{\text{РЛ}})$  – коэффициент различимости эхосигнала от ВЦ на фоне шума;  $\text{ПК}_{\text{РЛ}}$  – показатель качества радиолокационного наблюдения. Для величин  $P_{ЭС\text{ вх}}$  и  $P_{ЭШ\text{ вх}}$  справедливо:

$$P_{ЭС\text{ вх}} = \frac{P_{\text{ЗИ}} G_{\text{РЛС}}^2 \sigma_{\text{ВЦ}} \lambda^2 \gamma_{\text{ВЦ}}}{64 \pi^3 r_{\text{РЛС}}^4}, \quad (3.5)$$

$$P_{ЭШ\text{ вх}} = \frac{P_{\text{ШИ}} G_{\text{РЛС}}^2 \sigma_{\text{ВЦ}} \lambda^2 \gamma_{\text{ВЦ}}}{64 \pi^3 r_{\text{РЛС}}^4}, \quad (3.6)$$

где:  $G_{\text{РЛС}}^{\text{max}}$  – коэффициент усиления антенны РЛС в направлении максимума ДН;  $\sigma_{\text{ВЦ}}$  – эффективная площадь рассеяния лоцируемой ВЦ;  $\lambda$  – длина волны излучения РЛС;  $\gamma_{\text{ВЦ}}$  – коэффициент, учитывающий деполяризацию волн при отражении от ВЦ;  $r_{\text{РЛС}}^{\text{ВЦ}}$  – расстояние от РЛС до ВЦ. С учетом (3.5) и (3.6) получим условие наблюдения (3.4) в развернутом виде:

$$\frac{P_{\text{ЗИ}} G_{\text{РЛС}}^2 \sigma_{\text{ВЦ}} \lambda^2 \gamma_{\text{ВЦ}}}{P_{\text{СШ вх}} 64 \pi^3 r_{\text{РЛС}}^4 + P_{\text{ШИ}} G_{\text{РЛС}}^2 \sigma_{\text{ВЦ}} \lambda^2 \gamma_{\text{ВЦ}}} \geq K_{\text{разл}}(\text{ПК}_{\text{РЛ}}), \quad (3.7)$$

Из (3.7) вытекает соотношение для дальности радиолокационного наблюдения при использовании шумовой маскировки (ШМ) рабочего излучения РЛС, имеющее вид:

$$r_{\text{РЛ, ШМ}} \leq \sqrt[4]{\frac{[P_{\text{ЗИ}} - K_{\text{разл}}(\text{ПК}_{\text{РЛ}}) P_{\text{ШИ}}] G_{\text{РЛС}}^2 \sigma_{\text{ВЦ}} \lambda^2 \gamma_{\text{ВЦ}}}{64 \pi^3 K_{\text{разл}}(\text{ПК}_{\text{РЛ}}) P_{\text{СШ вх}}}}. \quad (3.8)$$

Это соотношение несложными преобразованиями приводится к виду:

$$r_{\text{РЛ, ШМ}} \leq \sqrt[4]{\frac{P_{\text{ЗИ}} G_{\text{РЛС}}^2 \sigma_{\text{ВЦ}}^2 \lambda^2 \gamma_{\text{ВЦ}}}{64 \pi^3 K_{\text{разл}}(\text{ПК}_{\text{РЛ}}) P_{\text{СШ вх}}}} \sqrt[4]{1 - \frac{K_{\text{разл}}(\text{ПК}_{\text{РЛ}})}{\left(\frac{P_{\text{ЗИ}}}{P_{\text{ШИ}}}\right)}} = r_{\text{РЛ,СШ}} K_{\text{сж}},$$

$$\text{ГДЕ: } r_{\text{РЛ,СШ}} = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{ЗИ}} G_{\text{РЛС}}^2 \sigma_{\text{ВЦ}}^2 \lambda^2 \gamma_{\text{ВЦ}}}{64 \pi^3 K_{\text{разл}}(\text{ПК}_{\text{РЛ}}) P_{\text{СШ вх}}}}$$

- максимальная дальность радиолокации при отсутствии помех (на фоне собственного шума (СШ));

$$K_{\text{сж}} = \sqrt[4]{1 - \frac{K_{\text{разл}}(\text{ПК}_{\text{РЛ}})}{\left(\frac{P_{\text{ЗИ}}}{P_{\text{ШИ}}}\right)}} = \sqrt[4]{1 - K_{\text{разл}}(\text{ПК}_{\text{РЛ}}) q_{\text{ЗИ/ШИ}}^2}. \quad (3.9)$$

- коэффициент сжатия зоны радиолокационного наблюдения при действии маскирующего шума в виде ШИ. Из (3.9) видно, что если  $q_{\text{ЗИ/ШИ}}^2 > K_{\text{разл}}(\text{ПК}_{\text{РЛ}})$  (выполняется условие наблюдения ЗИ на фоне ШИ), то всегда  $K_{\text{сж}} \leq 1$ , то есть действие шума, маскирующего рабочее излучение РЛС, приводит к уменьшению дальности радиолокационного наблюдения.

На рисунке 3.11 приведено семейство графиков зависимости  $K_{\text{сж}} = f(q_{\text{ЗИ/ШИ}}^2 | K_{\text{разл}}(\text{ПК}_{\text{РЛ}}))$ , рассчитанное согласно формуле (3.9).

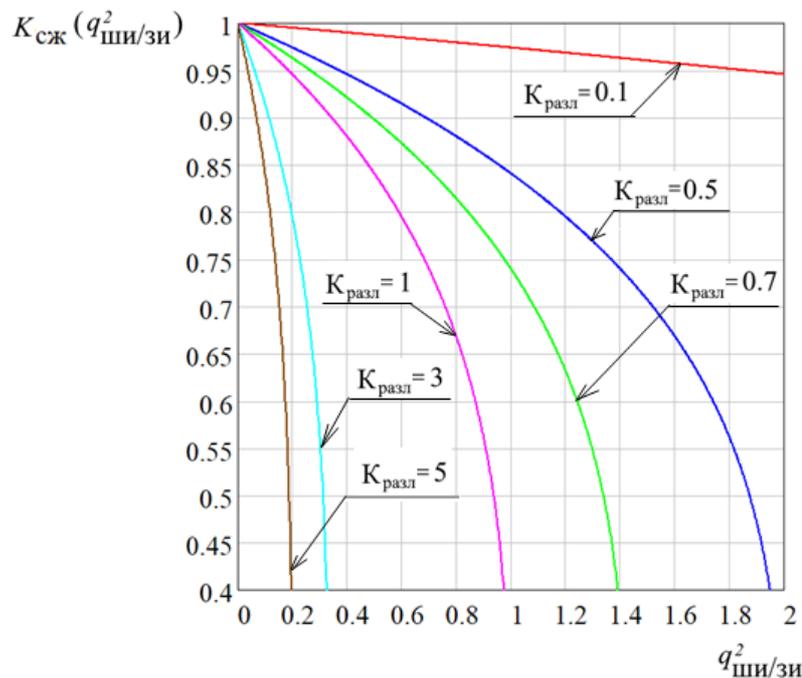


Рисунок 3.11 - Зависимость  $K_{\text{сж}}$  от  $q_{\text{ШИ/ЗИ}}^2$  при различных значениях

$$K_{\text{разл}}(\text{ПК}_{\text{РЛ}})$$

Выполненный анализ и рассмотрение графиков позволяет заключить следующее.

1. Степень влияния шумовой маскировки рабочего излучения РЛС на дальность радиолокации определяемая величиной  $K_{сж}$ , зависит от параметра  $q_{ЗИ/ШИ}^2$  (отношение мощностей ЗИ и ШИ), а также от величины коэффициента различимости  $K_{разл}(ПК_{РЛ})$ . Например, если  $K_{разл}(ПК_{РЛ})=1$ , а  $q_{ШИ/ЗИ}^2 = 0,1; 0,3; 0,5; 0,7$ , то величина  $K_{сж}=0,97; 0,92; 0,84; 0,74$  соответственно. При  $K_{разл}(ПК_{РЛ}) = 0,7$  величина  $K_{сж}$  составляет соответственно  $0,98; 0,94; 0,9; 0,85$ .

2. Параметр  $q_{ЗИ/ШИ}^2$  устанавливается исходя из требуемого качества маскировки ЗИ в приемном тракте средства РТР (смотри выше п. 3.2.1). Коэффициент различимости  $K_{разл}(ПК_{РЛ})$ , как известно [78], определяется величиной базы используемого зондирующего сигнала. Таким образом, при реализации шумовой маскировки рабочего излучения РЛС с помощью САП, встроенного в антенно-передающий тракт защищаемого РЛС, допустимая величина  $K_{сж}$  может быть установлена выбором базы используемых зондирующих импульсов.

### **3.2.3 Характеристика способа шумового прикрытия РЛС, основанного на использовании САП, встроенного в РЛС**

Предлагаемый способ защиты РЛС от средств РТР обеспечивает следующие преимущества:

1. За счет использования антенны и передающего тракта защищаемого РЛС обеспечивается возможность шумовой маскировки как бокового, так и зондирующего излучения РЛС, на базе только собственного энергетического ресурса РЛС.

2. За счет излучения импульсов шумовой маскировки в пределах «мертвой зоны» РЛС обеспечивается электромагнитная совместимость РЛС и САП шумового прикрытия по каналу прямого прохождения «РЛС – САП».

3. Уменьшение дальности радиолокационного наблюдения, имеющее место за счет действия «шумовых эхоимпульсов» может быть сведено к приемлемому уровню выбором величины базы зондирующих сигналов, а также частотного разноса ЗИ и ШИ.

4. Шумовая маскировка рабочего излучения РЛС может быть реализована как в наземных, так и в бортовых РЛС.

Недостатки предлагаемого способа:

1. Требуются дополнительные собственные энергетические затраты РЛС.

2. Не обеспечивается создание неопределенности (скрытие) углового направления на РЛС из точки стояния пеленгатора средства РТР.

3. Требуется модернизация антенно-передающего тракта РЛС.

### 3.3 Шумовая маскировка бокового излучения РЛС с помощью САП, размещаемого на позиции РЛС

#### 3.3.1 Сущность и параметры предлагаемого способа защиты РЛС

Под позицией РЛС будем понимать участок местности, в пределах которого разворачивается штатный комплект технических средств РЛС, в том числе, средств защиты РЛС.

Способ поясняется на рисунке 3.12, где обозначено:  $r_{САП}^{РЛС}$  расстояние между САП и РЛС;  $\theta_{САП}$  – ширина ДН антенны САП;  $R_{м.з.}$  – радиус собственной мертвой зоны РЛС; ЗИ и БИ – зондирующее и боковое излучение РЛС; ШИ – шумовое излучение САП.

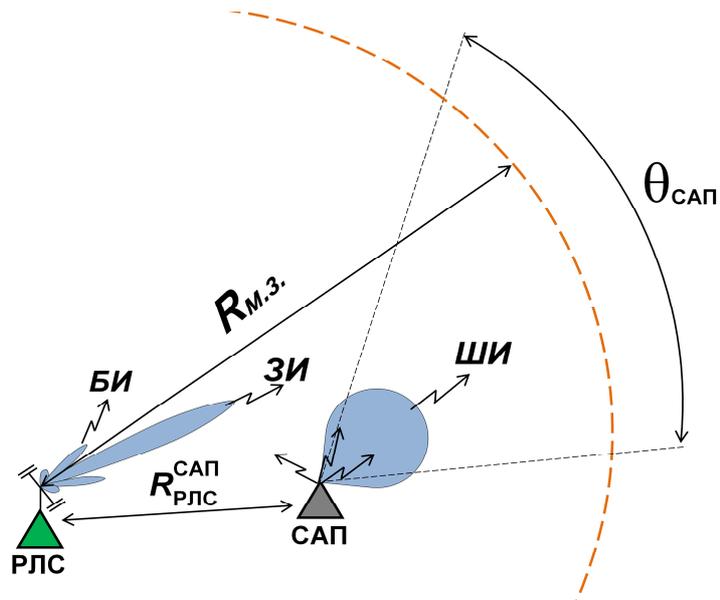


Рисунок 3.12 - Расположение САП шумового прикрытия в пределах мертвой зоны РЛС

Защищаемое РЛС и САП шумового прикрытия разнесены в пространстве. Расстояние  $r_{САП}^{РЛС}$  между точками стояния САП и РЛС удовлетворяет условиям:

$$R_{САП}^{РЛС} \leq R_{м.з.};$$

$$R_{САП}^{РЛС} < \delta_{СРТР},$$

где  $\delta_{\text{СРТР}}$  – линейное разрешение на местности, обеспечиваемое подавляемым средством РТР. Второе условие означает, что РЛС и САП не разрешаются пеленгатором средства РТР.

Ширина ДН антенны САП и ориентация ДН выбираются из условия обеспечения маскировки бокового излучения РЛС в пределах заданного углового сектора. Возможно размещение на позиции РЛС нескольких САП, каждое из которых «обслуживает» свой угловой сектор. Вариант такого размещения с участием четырех САП, обслуживающих совместно зону 360°, представлен на рисунке 3.13 где обозначено: ЗМИ РЛС - зона маскировки РЛС; ДНА САП - диаграмма направленности антенны САП, ДНА РЛС - диаграмма направленности антенны РЛС.

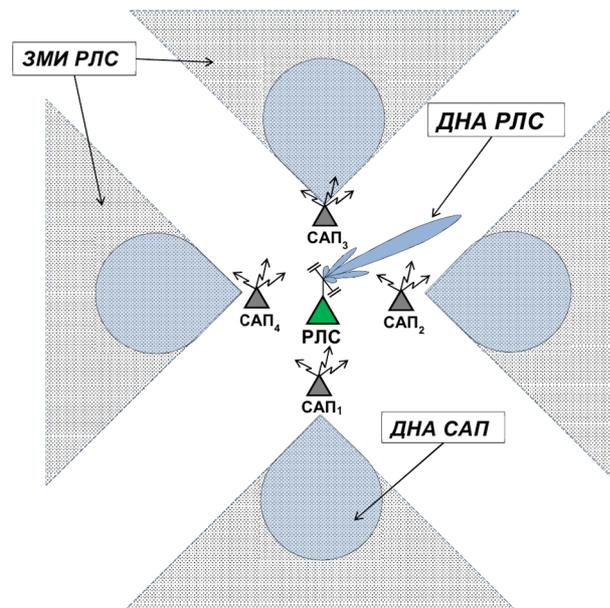


Рисунок 3.13 - Вариант размещения САП на позиции РЛС

Как и в способе, рассмотренном в разделе 3.2, маскировка импульсов бокового излучения защищаемого РЛС выполняется «накрывающими» либо «ответными» шумовыми импульсами (смотри раздел 3.1). В случае реализации шумовой маскировки «накрывающего» типа защищаемое РЛС формирует специальные синхронизирующие импульсы, задающие моменты  $t_{\text{ш.нач}}$  и  $t_{\text{ш.кон}}$  передних и задних фронтов шумовых импульсов.

Синхронизирующие импульсы передаются от РЛС к САП шумового прикрытия по специальной радиолинии или по кабельной линии (рисунок 3.14).

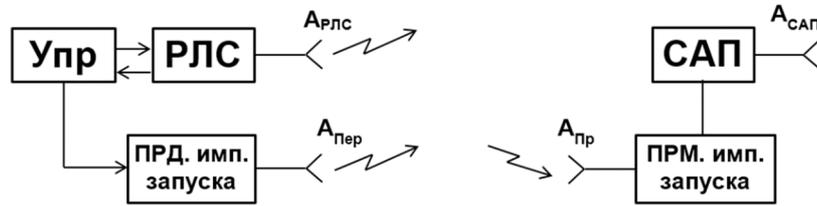


Рисунок 3.14 - Функциональная схема синхронизации РЛС и САП шумового прикрытия при шумовой маскировке «накрывающего» типа

При реализации маскировки «ответного» типа формирование синхронизирующих импульсов не требуется, так как САП, представляющая собой «шумовой ответчик» (рисунок 3.15), определяет моменты переднего и заднего фронтов излучаемых шумовых импульсов самостоятельно (смотри раздел 3.1). Моменты  $t_{ш.нач.}$  и  $t_{ш.кон.}$ , как и в случае, рассмотренном выше в п. 3.2, целесообразно рандомизировать.

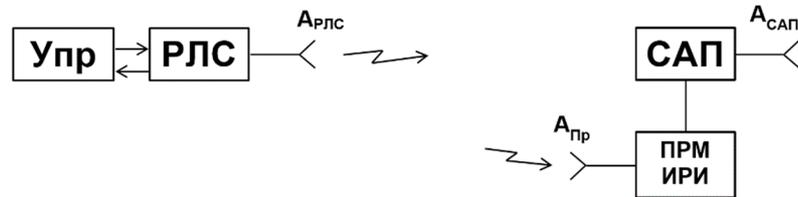


Рисунок 3.15 - Функциональная схема синхронизации РЛС и САП шумового прикрытия при шумовой маскировке «ответного» типа

Реализация САП шумового прикрытия возможна на базе т.н. «отвлекающих передатчиков», традиционно используемых как средство защиты наземных РЛС от противорадиолокационных УР (ПРУР). Примеры такого использования известны из литературы. Так, согласно [7, 19] в штатном комплекте РЛС MRQ-53, входящей в состав ЗРК Patriot, содержится несколько отвлекающих передатчиков, размещаемых при необходимости на некотором

удалении от защищаемого РЛС (в пределах позиции РЛС) и излучающих сигналы, являющиеся копиями зондирующих сигналов РЛС.

С учетом сказанного, предлагается возложить на уже имеющиеся в штатном комплекте РЛС «отвлекающие передатчики» дополнительную функцию – защиты от средств РТР. Для реализации этой функции «отвлекающий передатчик» должен быть двухрежимным, а именно: первый режим – «защита РЛС от ПРУР», второй режим – «защита РЛС от средств РТР». Режим защиты РЛС от ПРУР включается при обнаружении атаки ПРУР. При этом РЛС прекращает излучение зондирующих сигналов [7, 48, 57]. Режим защиты РЛС от средств РТР при наличии соответствующей угрозы включается одновременно с началом функционирования РЛС на излучение. Отличие указанных режимов состоит, во-первых, во времени работы на излучение, и, во-вторых, в форме и параметрах излучаемых сигналов. С учетом этого обстоятельства, целесообразна реализация обоих режимов на базе единого излучающего (передающего) устройства.

Важное преимущество рассматриваемого варианта организации шумового прикрытия РЛС состоит в том, что в данном случае (в отличие от случая, размещения САП шумового прикрытия в составе РЛС или на платформе РЛС) обеспечивается создание неопределенности углового направления на защищаемое РЛС в пределах углового сектора образуемого совокупностью САП. Увеличение углового сектора неопределенности обеспечивается при увеличении расстояний между защищаемым РЛС и САП прикрытия. Однако увеличение расстояний  $r_{САП}^{РЛС}$  приводит к увеличению радиуса расширенной мертвой зоны РЛС. Это обстоятельство необходимо учитывать при выборе конфигурации размещения САП прикрытия на позиции РЛС.

На отрезках времени, где происходит облучение любой лоцируемой ВЦ зондирующими сигналами РЛС, эта ВЦ облучается также шумовыми импульсами, излучаемыми САП шумового прикрытия РЛС. Присутствие

шумового компонента в эхосигнале от ВЦ приводит к уменьшению дальности радиолокационного наблюдения ВЦ. Уменьшение влияния указанного недостатка обеспечивается при использовании защищаемым РЛС зондирующих сигналов с увеличенными значениями базы (например, сигналов с ЛЧМ). Другой подход к устранению этого недостатка заключается в формировании «провала» ДН антенны САП в направлении оси ГЛ ДН антенны защищаемого РЛС на текущем отрезке времени. Информация о положении оси ГЛ ДН антенны РЛС в текущий момент времени может передаваться на позицию САП прикрытия по линии обмена данными между РЛС и САП. Это может быть та же линия, по которой на САП передаются импульсы временной синхронизации, задающие моменты  $t_{ш.нач.}$  и  $t_{ш.кон.}$  при использовании ШИ «накрывающего типа».

### 3.3.2 Требуемая мощность САП шумовой маскировки бокового излучения РЛС, размещаемого на позиции защищаемого РЛС

Требуемая мощность САП шумовой маскировки, согласно (2.9), определяется, в основном, импульсной мощностью защищаемого РЛС, размерами углового сектора, в пределах которого САП должно обеспечить шумовую маскировку бокового излучения РЛС, а также максимальными уровнями боковых лепестков ДН основной антенны РЛС в пределах этого сектора. Конкретные значения требуемой мощности могут быть определены на базе (2.9). Если  $r_{РЛС}^{САП} \ll r_{РЛС}^{СРТП}$ , то в случае САП, размещаемого на позиции защищаемого РЛС, справедливо приближенное равенство:  $r_{САП}^{СРТП} \approx r_{РЛС}^{СРТП}$ , поэтому с учетом того, что  $G_{РЛС}^A = G_{РЛС}^{max} \vartheta_{РЛС}^A$ , вместо (2.9) справедливо:

$$P_{САП}^{(A)} \text{ треб} \geq \frac{P_{РЛС} G_{РЛС}^{max} \vartheta_{РЛС}^A K_f K_{под}(\text{ПК}_{\text{треб}})}{G_{САП}^A}, \quad (3.10)$$

Это соотношение формально совпадает с формулой (2.10), оно определяет мощность, требуемую для маскировки излучения РЛС в произвольной точке А в пределах углового сектора, определяемого шириной ДН антенны САП.

Результаты расчетов величины  $P_{САП\text{ треб}}^{(A)}$  применительно к случаям маскировки излучения РЛС малой и средней дальности, выполненных на основе формулы (3.10), совпадают с приведенными на рисунках 2.4 и 2.5 применительно к случаю  $r_{САП}^{СРТР} = r_{РЛС}^{СРТР} = 300$  км и ввиду ограничения на объем работы в данном разделе не приводятся.

### **3.3.3 Зоны маскировки излучения РЛС, обеспечиваемые при размещении САП шумового прикрытия на позиции защищаемого РЛС**

Результаты расчетов в виде графических изображений соответствующих зон маскировки излучения РЛС, обеспечиваемых при размещении САП шумового прикрытия на позиции защищаемого РЛС малой дальности представлены в п. 2.2.3.2 на рисунках 2.10 - 2.15, а для случая защиты РЛС средней дальности – на рисунках 2.19 – 2.24.

### **3.3.4 Оценка влияния шума, маскирующего импульсы излучения РЛС, на дальность радиолокации**

Методика оценки влияния шума, маскирующего боковое излучение защищаемого РЛС, на дальность радиолокационного наблюдения, мало отличается от соответствующей методики, содержащейся в разделе 3.2.2.

Условие радиолокационного наблюдения ВЦ при использовании шумовой маскировки излучения РЛС совпадает с (3.4) (см. раздел 3.2.2), а именно:

$$\frac{P_{\text{ЭС вх}}}{P_{\text{ЭШ вх}} + P_{\text{СШ вх}}} \geq K_{\text{разл}}(\text{ПК}_{\text{РЛ}}),$$

где  $P_{\text{ЭС вх}}$  и  $P_{\text{ЭШ вх}}$  - мощность эхосигнала (ЗИ, отраженного от ВЦ) и мощность эхошума (ШИ, отраженного от ВЦ) на входе приемного тракта РЛС;  $P_{\text{СШ вх}}$  - мощность собственного шума приемника РЛС, приведенная к его входу;  $K_{\text{разл}}(\text{ПК}_{\text{РЛ}})$  - коэффициент различимости эхосигнала от ВЦ на фоне шума;  $\text{ПК}_{\text{РЛ}}$  - показатель качества радиолокационного наблюдения. Для величин  $P_{\text{ЭС вх}}$  и  $P_{\text{ЭШ вх}}$  в данном случае справедливо:

$$P_{\text{ЭС вх}} = \frac{P_{\text{ЗИ}} G_{\text{РЛС}}^2 \sigma_{\text{ВЦ}} \lambda^2 \gamma_{\text{ВЦ}}}{64 \pi^3 r_{\text{РЛС}}^4 \text{ВЦ}}$$

- (совпадает с (3.5));

$$P_{\text{ЭШ вх}} = \frac{P_{\text{ШИ}} G_{\text{САП}}^{\text{ВЦ}} G_{\text{РЛС}}^{\text{max}} \sigma_{\text{ВЦ}} \lambda^2 \gamma_{\text{ВЦ}}}{64 \pi^3 r_{\text{РЛС}}^4 \text{ВЦ}} \quad (3.11)$$

- поскольку в данном случае  $r_{\text{РЛС}}^{\text{ВЦ}} \approx r_{\text{САП}}^{\text{ВЦ}}$ .

В этих соотношениях, по-прежнему:  $G_{\text{РЛС}}^{\text{max}}$  - коэффициент усиления антенны РЛС в направлении максимума ДН;  $\sigma_{\text{ВЦ}}$  - эффективная площадь рассеяния лоцируемой ВЦ;  $\lambda$  - длина волны излучения РЛС;  $\gamma_{\text{ВЦ}}$  - коэффициент, учитывающий деполяризацию волн при отражении от ВЦ;  $r_{\text{РЛС}}^{\text{ВЦ}}$  - расстояние от РЛС до ВЦ. С учетом (3.5) и (3.11), после несложных преобразований, получим условие наблюдения (3.4) в развернутом виде:

$$\frac{P_{\text{ЗИ}} G_{\text{РЛС}}^2 \sigma_{\text{ВЦ}} \lambda^2 \gamma_{\text{ВЦ}}}{P_{\text{СШ вх}} 64 \pi^3 r_{\text{РЛС}}^4 \text{ВЦ} + P_{\text{ШИ}} G_{\text{РЛС}}^{\text{max}} G_{\text{САП}}^{\text{ВЦ}} \sigma_{\text{ВЦ}} \lambda^2 \gamma_{\text{ВЦ}}} \geq K_{\text{разл}}(\text{ПК}_{\text{РЛ}}), \quad (3.12)$$

Из (3.12) вытекает соотношение для дальности радиолокационного наблюдения при наличии шумовой маскировки (ШМ) рабочего излучения РЛС, имеющее вид:

$$r_{\text{РЛ, ШМ}} \leq \sqrt[4]{\frac{[P_{\text{ЗИ}} G_{\text{РЛС}}^2 \sigma_{\text{ВЦ}} \lambda^2 \gamma_{\text{ВЦ}} - P_{\text{ШИ}} K_{\text{разл}}(\text{ПК}_{\text{РЛ}}) G_{\text{РЛС}}^{\text{max}} G_{\text{САП}}^{\text{ВЦ}}] \sigma_{\text{ВЦ}} \lambda^2 \gamma_{\text{ВЦ}}}{64 \pi^3 K_{\text{разл}}(\text{ПК}_{\text{РЛ}}) P_{\text{СШ вх}}}}. \quad (3.13)$$

Это соотношение несложными преобразованиями приводится к виду:

$$r_{\text{РЛ, ШМ}} \leq \sqrt[4]{\frac{P_{\text{ЗИ}} G_{\text{РЛС}}^2 \sigma_{\text{ВЦ}} \lambda^2 \gamma_{\text{ВЦ}}}{64 \pi^3 K_{\text{разл}}(\text{ПК}_{\text{РЛ}}) P_{\text{СШ вх}}}} \sqrt[4]{1 - \frac{K_{\text{разл}}(\text{ПК}_{\text{РЛ}})}{\left(\frac{P_{\text{ЗИ}}}{P_{\text{ШИ}}}\right) \left(\frac{G_{\text{РЛС}}^{\text{max}}}{G_{\text{САП}}^{\text{ВЦ}}}\right)}} = r_{\text{РЛ СШ}} K_{\text{СЖ}},$$

$$\text{ГДЕ: } r_{\text{РЛ СШ}} = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{ЗИ}} G_{\text{РЛС}}^{\text{max}} \sigma_{\text{ВЦ}} \lambda^2 \gamma_{\text{ВЦ}}}{64 \pi^3 K_{\text{разл}}(\text{ПКРЛ}) P_{\text{СШ вх}}}}$$

- максимальная дальность радиолокации при отсутствии помех (на фоне собственного шума (СШ));

$$K_{\text{сж}} = \sqrt[4]{1 - \frac{K_{\text{разл}}(\text{ПКРЛ})}{\left(\frac{P_{\text{ЗИ}}}{P_{\text{ШИ}}}\right) \left(\frac{G_{\text{РЛС}}^{\text{max}}}{G_{\text{САП}}}\right)}} = \sqrt[4]{1 - \frac{K_{\text{разл}}(\text{ПКРЛ}) P_{\text{САП}} G_{\text{САП}}}{P_{\text{РЛС}} G_{\text{РЛС}}^{\text{max}}}}. \quad (3.14)$$

- коэффициент сжатия зоны радиолокационного наблюдения при действии маскирующего шума в виде ШИ.

На рисунках 3.15, 3.16 приведены графики зависимостей  $K_{\text{сж}} = f(P_{\text{САП}} | K_{\text{разл}}(\text{ПКРЛ}))$ , рассчитанные согласно формуле (3.14) для РЛС малой и средней дальности действия.

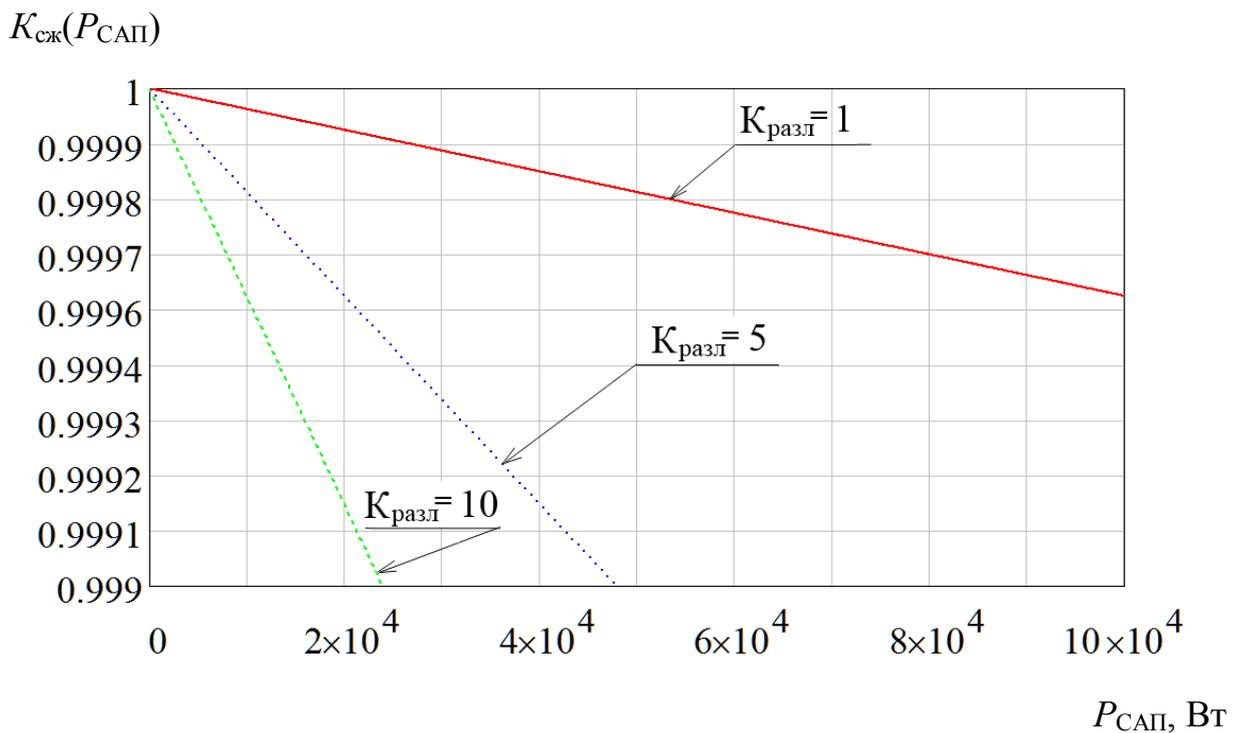


Рисунок 3.15 - Семейство графиков зависимостей  $K_{\text{сж}}$  от  $P_{\text{САП}}$  мощности САП шумового прикрытия для РЛС малой дальности

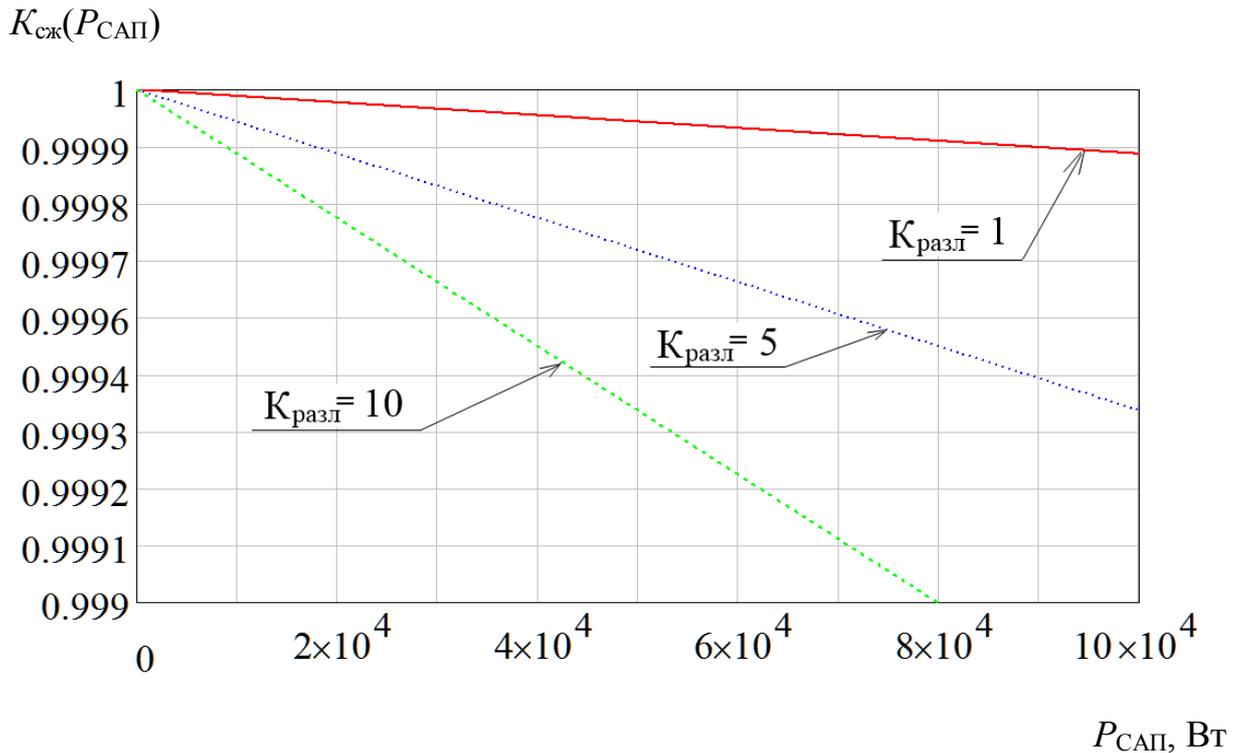


Рисунок 3.16 - Семейство графиков зависимостей  $K_{сж}$  от  $P_{САП}$  мощности САП шумового прикрытия для РЛС средней дальности

Выполненный анализ и рассмотрение графиков позволяет заключить следующее.

Степень влияния шумовой маскировки рабочего излучения РЛС на дальность радиолокации определяемая величиной  $K_{сж}$ , зависит от  $P_{САП}$  мощности САП шумового прикрытия, а также от величины коэффициента различимости  $K_{разл}$  (ПК<sub>РЛ</sub>). Параметр  $P_{САП}$  мощности САП шумового прикрытия устанавливается исходя из технической реализуемости. При  $P_{САП} = 15$  кВт для РЛС рассматриваемых типов величина  $K_{сж}$  коэффициента сжатия зоны радиолокационного наблюдения при действии маскирующего шума составляет не менее 0,999.

Таким образом, при реализации шумовой маскировки бокового излучения РЛС с помощью САП, расположенного на позиции защищаемого РЛС, дальность радиолокационного наблюдения практически не ухудшается по сравнению со случаем отсутствия маскирующего шума.

### 3.4 Шумовая маскировка бокового излучения РЛС от орбитальных средств РТР

#### 3.4.1 Сущность и параметры предлагаемого способа защиты РЛС

Способ поясняется на рисунке 3.17, где обозначено:  $r_{САП}^{РЛС}$  – расстояние между САП и РЛС;  $\theta_{САП}$  – ширина ДН антенны САП; ЗИ и БИ – зондирующее и боковое излучение РЛС; ШИ – шумовое излучение САП.

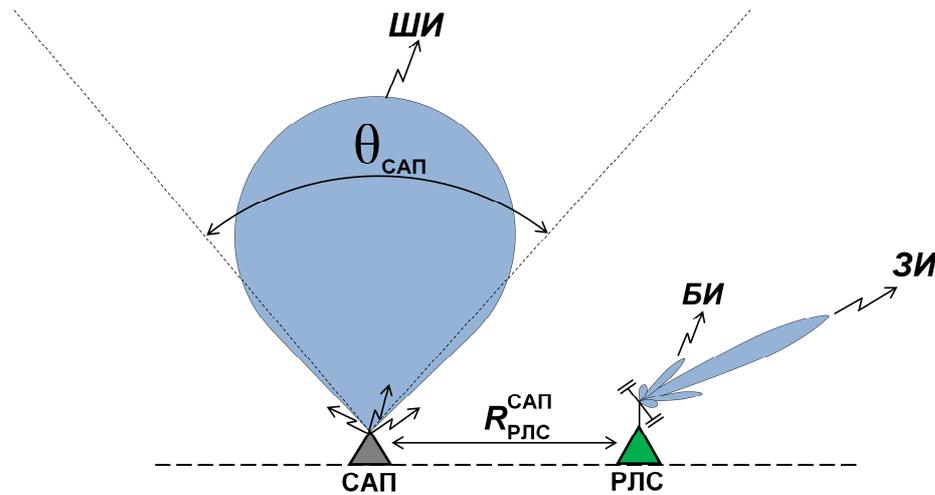


Рисунок 3.17 - Способ защиты бокового излучения РЛС от орбитальных средств РТР

Защищаемое РЛС и САП шумового прикрытия разнесены в пространстве. Антенна САП ориентирована в верхнюю полусферу в направлении орбиты космического ЛА (КЛА) радиотехнической разведки противной стороны. Если орбита КЛА неизвестна, антенна САП шумовой маскировки ориентируется в зенит. Ширина ДН антенны САП удовлетворяет условию обеспечения требуемой зоны маскировки.

Расстояние  $r_{САП}^{РЛС}$  между точками стояния САП и РЛС удовлетворяет условию:

$$r_{САП}^{РЛС} \leq \delta_l,$$

где  $\delta_l$  – линейное разрешение излучающих объектов, расположенных на земной поверхности, орбитальным средством РТР.

Возможно размещение в районе позиции РЛС нескольких САП, каждое из которых «обслуживает» свой угловой сектор в верхней полусфере.

Маскировка импульсов бокового излучения защищаемого РЛС выполняется «накрывающими» шумовыми импульсами (смотри п. 3.1). Для реализации шумовой маскировки «накрывающего» типа защищаемое РЛС формирует специальные синхронизирующие импульсы, задающие моменты  $t_{ш.нач}$  и  $t_{ш.кон}$  передних и задних фронтов шумовых импульсов (смотри рисунок 3.4). Синхронизирующие импульсы передаются от РЛС к САП шумового прикрытия по специальной радиолинии или по кабельной линии. Моменты  $t_{ш.нач}$  и  $t_{ш.кон}$ , как и в случае, рассмотренном выше в п. 3.2 и п. 3.3, целесообразно рандомизировать.

Благодаря пространственному разнесу защищаемого РЛС и САП прикрытия, обеспечивается создание неопределенности углового направления на защищаемое РЛС в пределах углового сектора образуемого совокупностью САП (как минимум). Соответственно, увеличивается ошибка определения координат точки стояния защищаемого РЛС. Увеличение углового сектора неопределенности обеспечивается при увеличении расстояний между защищаемым РЛС и САП прикрытия. Как и в случае, рассмотренном в п. 3.3, реализация САП шумового прикрытия возможна на базе т.н. «отвлекающих передатчиков», используемых как средство защиты наземных РЛС от противорадиолокационных УР (ПРУР).

Предлагается возложить на уже имеющиеся в штатном комплекте РЛС отвлекающие передатчики дополнительную функцию – защиты от средств космической РТР. Для реализации этой функции отвлекающий передатчик должен быть двухрежимным, а именно: первый режим – «Защита РЛС от ПРУР», второй режим – «Защита РЛС от космической РТР». Режим защиты РЛС от ПРУР включается при обнаружении атаки ПРУР. Режим защиты РЛС

от космической РТР при наличии соответствующей угрозы включается одновременно с началом функционирования РЛС на излучение. Отличие указанных режимов состоит, во-первых, во времени работы на излучение, и, во-вторых, в форме и параметрах излучаемых сигналов. С учетом этого обстоятельства, целесообразна реализация обоих режимов на базе единого излучающего (передающего) устройства. Антенна САП в режиме «Защита от космической РТР» ориентируется в направлении орбиты КЛА – носителя СРТР.

### 3.5 Имитационно-шумовое прикрытие РЛС

Предлагается развитие способа защиты РЛС от средств РТР, основанного на использовании встроенных средств шумовой маскировки излучения защищаемого РЛС, описанного выше в разделе 3.2, путем его дополнения средствами имитации излучения РЛС.

Сущность предлагаемого способа заключается в том, что в состав средств защиты радиолокационного средства, описанного в разделе 3.2, содержащего средства шумовой маскировки рабочего излучения, встроенные в антенно-передающий тракт РЛС, включается имитатор антенно-передающего тракта защищаемого РЛС, размещаемый на дополнительной пространственно удаленной позиции (рисунок 3.18).

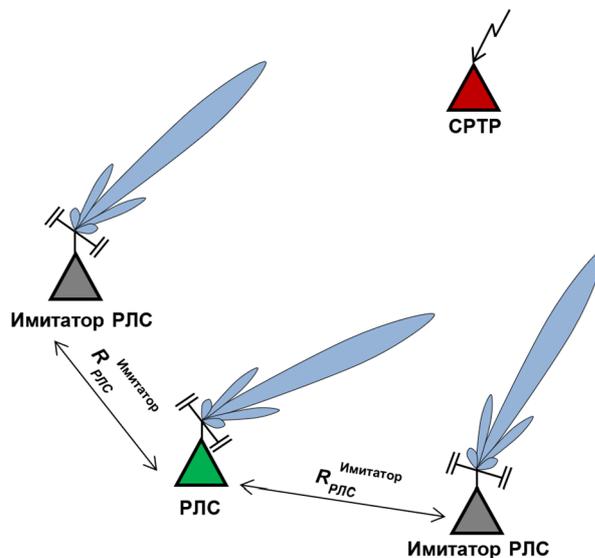


Рисунок 3.18 - Имитационно-шумовое прикрытие РЛС

Имитатор включает формирователь зондирующих сигналов, средства шумовой маскировки рабочего излучения, встроенные в антенно-передающий тракт, радиопередающее устройство и антенну, одинаковые с аналогичными средствами защищаемого РЛС.

Расстояние между РЛС и имитатором выбирается исходя из линейной разрешающей способности излучателей на местности, обеспечиваемой средствами РТР противной стороны. А именно, расстояние должно быть достаточным, чтобы РЛС и имитатор воспринимались средствами РТР как два пространственно разнесенных объекта.

Согласование программ обзора пространства РЛС и имитатора, а также синхронизация излучения РЛС и имитатора по моментам излучения, частотам и форме излучаемых сигналов, не требуется. Таким образом, имитатор создает ложную позицию защищаемого РЛС.

Имитатор может быть построен, например, на базе РЛС, однотипного с защищаемым РЛС, выработавшего свой ресурс или выведенного из эксплуатации, но имеющего исправные антенну и передающее устройство [51].

Использование имитатора в составе радиолокационно-помехового комплекса позволяет устранить недостаток способа, изложенного в разделе 3.2. Этот недостаток заключается в том, что средства шумовой маскировки, встроенные в РЛС, не позволяют создать неопределенность координат защищаемого РЛС для средств РТР.

### 3.6 Выводы по разделу 3

1. При организации радиоподавления средств РТР в интересах защиты РЛС возникают следующие трудности:

– для обеспечения возможностей шумовой маскировки, а также имитации и искажения излучения защищаемого РЛС, формируемого в угловом секторе главного лепестка ДН антенны, требуются САП с очень высокими уровнями энергопотенциала (на уровне энергопотенциала защищаемого РЛС, который в случае РЛС обнаружения ВЦ и МФ РЛС может достигать  $(10^8 \dots 10^9)$  Вт и более;

– при решении задач шумовой маскировки, имитации и искажения бокового излучения защищаемого РЛС также требуются САП с высокими уровнями мощности, что справедливо в наибольшей степени применительно к случаям, когда активному прикрытию подлежит излучение РЛС в угловых секторах, соответствующих ближним боковым лепесткам ДН антенны РЛС, а также когда активное прикрытие РЛС должно быть заградительным по угловым направлениям (в широком секторе боковых лепестков ДН защищаемого РЛС) или (и) по частоте;

– при решении задач шумовой маскировки излучения защищаемого РЛС неизбежно возникает необходимость обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) этого РЛС и САП шумового прикрытия, поскольку излучение САП может воздействовать на приемный тракт защищаемого РЛС по каналу прямого прохождения «САП-РЛС», а также по каналам переотражения «САП - подстилающая поверхность - РЛС» и «САП - лоцируемый объект - РЛС»;

– аддитивное взаимодействие излучения САП шумовой маскировки и зондирующего излучения защищаемого РЛС неизбежно приводит к уменьшению дальности радиолокационного наблюдения РЛС («сжатию» зоны видимости РЛС).

2. Снижение требований к мощности САП прикрытия РЛС возможно следующими путями:

- использование в составе САП прикрытия РЛС антенн с высокими коэффициентами усиления;

- выдвижение САП шумового прикрытия РЛС в направлении зоны расположения средств РТР;

- использование САП шумового прикрытия РЛС, встроенного в антенно-передающий тракт РЛС.

3. Обеспечение электромагнитной совместимости защищаемого РЛС и САП прикрытия возможно путем реализации следующих мер:

- формирование шума, маскирующего или (и) искажающего излучение защищаемого РЛС, прицельно по времени излучения РЛС, при этом возможны варианты реализации «накрывающих» и «ответных» шумовых импульсов;

- формирование шума, маскирующего или (и) искажающего излучение защищаемого РЛС, со сдвигом по частоте относительно излучения РЛС.

4. Уменьшение влияния шума, маскирующего излучение защищаемого РЛС, на дальность радиолокационного наблюдения возможно путем реализации следующих мер:

- использование в защищаемом РЛС зондирующих сигналов с увеличенными значениями базы;

- формирование шума, маскирующего или искажающего излучение защищаемого РЛС, со сдвигом по частоте относительно излучения РЛС.

5. Меры по преодолению трудностей, возникающих при организации радиоподавления средств РТР, предложенные в диссертационной работе, позволили разработать технически реализуемые предложения по организации защиты РЛС от средств РТР следующими способами:

- способ шумовой маскировки излучения РЛС, основанный на использовании САП, встроенного в антенно-передающий тракт РЛС;

- способ шумовой маскировки бокового излучения РЛС с помощью САП, размещаемого на позиции РЛС;

- способ шумовой маскировки бокового излучения РЛС от космических средств РТР;

– способ имитационно-шумового прикрытия РЛС.

6. Шумовая маскировка излучения РЛС, основанная на использовании САП, встроенного в антенно-передающий тракт РЛС, позволяет реализовать маскировку бокового и зондирующего (по главному лепестку ДН) излучения РЛС. Электромагнитная совместимость РЛС и САП обеспечивается за счет использования маскирующих шумовых импульсов «накрывающего» типа. Уменьшение дальности радиолокационного наблюдения за счет действия эхошума совместно с эхосигналом может быть установлено на допустимом уровне выбором базы зондирующего сигнала. Недостаток способа заключается в том, что он не обеспечивает скрывание (создание неопределенности) координат точки стояния РЛС.

7. Шумовая маскировка бокового излучения РЛС, основанная на использовании САП, размещаемых на позиции РЛС, позволяет реализовать маскировку бокового излучения РЛС. Электромагнитная совместимость САП и РЛС обеспечивается за счет использования шумовых импульсов «накрывающего» или «ответного типов». Создание неопределенности координат точки стояния РЛС обеспечивается в пределах геометрических размеров позиции РЛС.

8. Защита РЛС от средств космической РТР обеспечивается путем шумовой маскировки излучения РЛС в пределах верхних боковых лепестков ДН антенны РЛС. Выбор расстояния между защищаемым РЛС и САП шумового прикрытия должен обеспечивать отсутствие разрешения защищаемого РЛС и САП.

9. Создание неопределенности координат точки стояния защищаемого РЛС обеспечивается путем имитационного прикрытия РЛС. Расстояние между РЛС и имитаторами РЛС должно обеспечивать их линейное разрешение на местности.

## **4 Оценка эффективности разработанных предложений по организации радиоподавления средств РТР в интересах защиты РЛС**

### **4.1 Расчетно-имитационная модель для оценки эффективности радиоподавления СРТР в интересах защиты РЛС**

В качестве инструмента для определения эффективности предложений по организации радиоподавления средств РТР в интересах защиты РЛС используется компьютерная расчетно-имитационная модель, разработанная лично автором, которая содержит программные средства для расчета показателей эффективности шумового прикрытия РЛС. Каждое из этих средств позволяет рассчитать ДН соответствующих антенн по задаваемым исходным данным. Исходными данными являются конфигурация, размеры и другие необходимые параметры фазированной антенной решетки, используемой в качестве модели антенны РЛС (или плоского раскрыва, используемого в качестве модели антенны средства РТР или САП). Кроме того, имеются средства для задания координат РЛС, САП и средства РТР на местности, а также для выполнения расчетов показателей энергетической скрытности излучения РЛС и графического отображения результатов. Компьютерная имитационная модель представляет собой программу, разработанную в среде программирования DELPHI и выполненную в виде вызываемого графического окна с элементами управления. Структурная схема модели представлена на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 - Структурная схема модели

Разработанная расчетно-имитационная модель позволяет рассчитывать показатели энергетической скрытности с учетом следующих параметров:

- тип РЛС;
- импульсная мощность передатчика РЛС;
- координаты РЛС;
- рабочая длина волны РЛС;
- число излучателей по горизонтали и по вертикали ФАР РЛС;
- шаг излучателей по горизонтали и по вертикали ФАР РЛС;
- амплитудное распределение ФАР РЛС;
- ошибки воспроизведения фазы и амплитуды ФАР РЛС;
- количество САП;
- мощность передатчика САП;

- ориентация антенн САП;
- ширина ДН САП;
- коэффициент усиления антенн САП;
- чувствительность приемника СРТР;
- ориентация антенны СРТР;
- ширина ДН СРТР;
- коэффициент усиления антенны СРТР;
- коэффициент подавления приемника СРТР.

Далее приводятся описание и результаты модельных экспериментов по оценке эффективности разработанных в разделе 3 предложений по организации радиоподавления средств РТР в интересах защиты РЛС для нескольких сценариев разведки.

## **4.2 Модельный эксперимент по определению эффективности шумовой маскировки излучения РЛС в целях защиты от средств РТР**

### **4.2.1 Описание модельного эксперимента**

Для оценки эффективности шумовой маскировки излучения РЛС в данной работе использованы следующие показатели энергетической скрытности излучения РЛС: индекс энергетической скрытности (ИЭС) и угловая панорама энергетической скрытности (УПЭС), разработанные автором лично.

В процессе моделирования имитируется радиолокационный обзор сектора азимутальных углов  $\beta \in [\beta_{\min}, \beta_{\max}]$  и углов места  $\varepsilon \in [\varepsilon_{\min}, \varepsilon_{\max}]$  (рисунок 4.2).

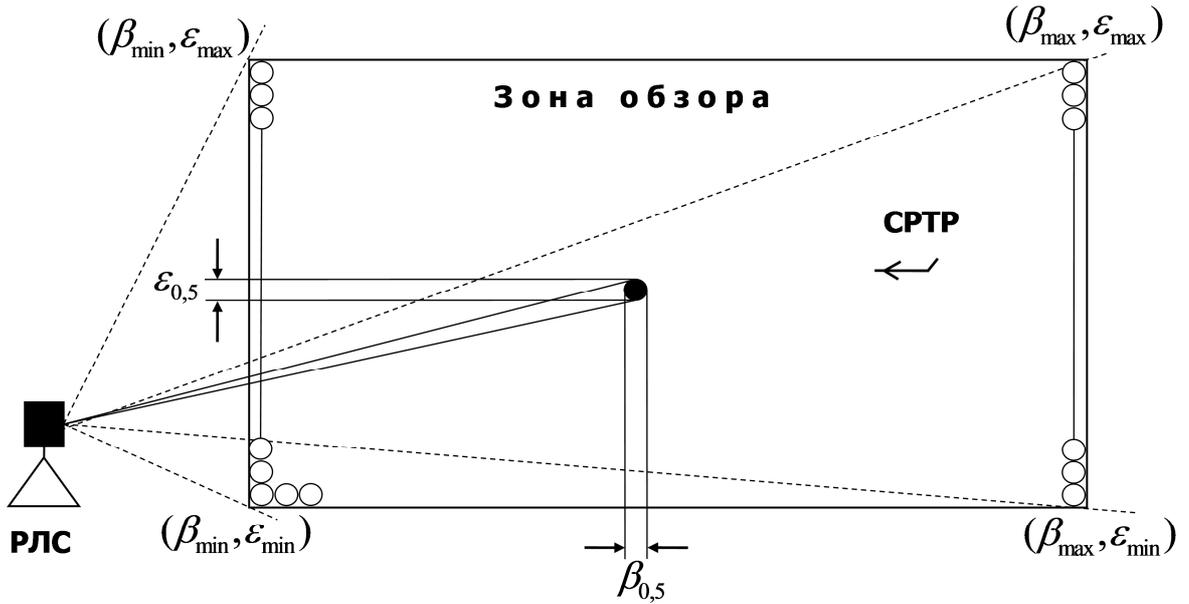


Рисунок 4.2 - Радиолокационный обзор угловой зоны

В процессе обзора РЛС, имеющая ФАР, зондирует в той или иной очередности угловые направления  $(\beta_i, \varepsilon_j)$ ,  $\beta_i \in [\beta_{\min}, \beta_{\max}]$ ,  $\varepsilon_j \in [\varepsilon_{\min}, \varepsilon_{\max}]$ ,  $i = 1, 2, \dots, N_\beta$ ,  $j = 1, 2, \dots, N_\varepsilon$ , где  $N_\beta, N_\varepsilon$  – число угловых ячеек по азимуту и углу места, соответственно. Шаг сканирования ДН по координатам  $\beta$  и  $\varepsilon$  не превышает ширину главного лепестка ДН  $\beta_{0,5}$  и  $\varepsilon_{0,5}$  по этим координатам. В пределах зоны обзора в точке с координатами  $(R_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}}, \beta_{\text{СРТР}}, \varepsilon_{\text{СРТР}})$  в сферической системе координат с центром в точке стояния РЛС расположено СРТР, которое принимается неподвижным на время одного цикла обзора РЛС, вследствие чего, очередность зондирования угловых ячеек  $(\beta_i, \varepsilon_j)$  (программа обзора) РЛС в рассматриваемом случае несущественна. Здесь  $R_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}}$  – расстояние между РЛС и СРТР.

Рассматриваемая имитационная модель позволяет рассчитать угловую панораму энергетической скрытности (УПЭС) РЛС по отношению к СРТР, а также индекс энергетической скрытности (ИЭС) РЛС при заданных параметрах и взаимном пространственном положении РЛС и СРТР.

Эта задача решается следующим образом. При каждом фиксированном положении  $(\beta_i, \varepsilon_j)$  главного лепестка ДН ФАР в процессе обзора вычисляется мощность сигнала РЛС на входе приемника СРТР согласно (2.2)

$$P_{\text{с. вх. СРТР}}(i, j) = \frac{P_{\text{РЛС}} G_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}}(\beta_{\text{СРТР}}, \varepsilon_{\text{СРТР}} / \beta_{\text{ГЛ}} = \beta_i, \varepsilon_{\text{ГЛ}} = \varepsilon_j) G_{\text{СРТР}}^{\text{РЛС}} \lambda^2 \gamma_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}}}{(4\pi)^2 (r_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}})^2},$$

где  $P_{\text{РЛС}}$  – мощность излучения РЛС в импульсе;  $G_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}}(\beta_{\text{СРТР}}, \varepsilon_{\text{СРТР}} / \beta_{\text{ГЛ}} = \beta_i, \varepsilon_{\text{ГЛ}} = \varepsilon_j)$  – усиление антенны РЛС в направлении  $(\beta_{\text{СРТР}}, \varepsilon_{\text{СРТР}})$  при условии, что ГЛ ДН антенны РЛС сформирован в направлении  $(\beta_i, \varepsilon_j)$ ;  $\beta_{\text{ГЛ}}$  и  $\varepsilon_{\text{ГЛ}}$  – направление ГЛ ДН антенны РЛС по азимуту и углу места, соответственно;  $G_{\text{СРТР}}^{\text{РЛС}}$  – усиление приемной антенны СРТР в направлении РЛС;  $\lambda$  – длина волны излучения РЛС;  $\gamma_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}}$  – коэффициент, учитывающий рассогласование поляризации антенн РЛС и СРТР (при совпадении поляризаций  $\gamma_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}} = 1$ );  $r_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}}$  – расстояние между РЛС и СРТР. При отсутствии САП вычисленное значение  $P_{\text{с. вх. СРТР}}(i, j), i = 1, 2, \dots, N_\beta, j = 1, 2, \dots, N_\varepsilon$  сравнивается с величиной чувствительности  $W_{\text{СРТР}}$  приемника СРТР. Если

$$P_{\text{с. вх. СРТР}}(i, j) \geq W_{\text{СРТР}}, \quad (4.1)$$

то выносится решение о том, что СРТР обнаруживает излучение РЛС, при этом производится присвоение:  $УПЭС(i, j) = 1$ , в противном случае присваивается  $УПЭС(i, j) = 0$ . При наличии САП шумовой маскировки излучения РЛС помимо вычисления  $P_{\text{с. вх. СРТР}}(i, j), i = 1, 2, \dots, N_\beta, j = 1, 2, \dots, N_\varepsilon$  мощности сигнала РЛС на входе приемника СРТР производится расчет  $P_{\text{ШП вх. СРТР}}, i = 1, 2, \dots, N_\beta, j = 1, 2, \dots, N_\varepsilon$  мощности ШП на входе приемника СРТР по формуле (2.3) и вычисляется условие подавления средства РТР на основе соотношения (2.4) с учетом (2.8) и  $K_{\text{ШП}f} = 1$  (см. п. 2.2.1.2).

$$\frac{P_{\text{САП}} G_{\text{САП}}^{\text{СРТР}} G_{\text{СРТР}}^{\text{САП}} \left( r_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}} \right)^2}{P_{\text{РЛС}} G_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}} \left( \beta_{\text{СРТР}}, \varepsilon_{\text{СРТР}} / \beta_{\text{ГЛ}} = \beta_i, \varepsilon_{\text{ГЛ}} = \varepsilon_j \right) G_{\text{СРТР}}^{\text{РЛС}} \left( r_{\text{САП}}^{\text{СРТР}} \right)^2} \geq K_{\text{под}}(\text{ПК}_{\text{треб}}) \quad (4.2)$$

Если при фиксированном положении  $(\beta_i, \varepsilon_j)$  ГЛ ДН РЛС условие подавления (4.2) выполняется, то выносится решение о том, что средство РТР не обнаруживает излучение РЛС, при этом производится присвоение:  $УПЭС(i, j) = 0$ , в противном случае присваивается  $УПЭС(i, j) = 1$ .

Двумерный массив  $УПЭС(i, j)$ , сформированный после просмотра всех угловых ячеек  $(\beta_i, \varepsilon_j)$ ,  $i = 1, 2, \dots, N_\beta$ ,  $j = 1, 2, \dots, N_\varepsilon$  представляет собой угловую панораму энергетической скрытности излучения РЛС.

Индекс энергетической скрытности рассчитывается по формуле

$$ИЭС = \frac{N_\beta N_\varepsilon - \sum_{i=1}^{N_\beta} \sum_{j=1}^{N_\varepsilon} УПЭС(i, j)}{N_\beta N_\varepsilon} \cdot 100 \% \quad (4.3)$$

При выводе УПЭС на экран ПЭВМ производится окрашивание соответствующих точек в разные цвета. Угловые ячейки, при зондировании которых излучение РЛС обнаруживается средством РТР, окрашиваются в красный цвет, а остальные – в зеленый. Таким образом формируется наглядное представление об уровне энергетической скрытности РЛС.

#### 4.2.2 Общие параметры модельного эксперимента

Рассматриваются три варианта организации радиоподавления средств РТР в интересах защиты РЛС:

- шумовая маскировка с помощью САП, встроенного в антенно-передающий тракт РЛС;
- шумовая маскировка бокового излучения РЛС с помощью САП, размещаемых на позиции РЛС;
- шумовая маскировка бокового излучения РЛС от орбитальных средств РТР.

В качестве объектов защиты от средств РТР при проведении модельного эксперимента выбраны РЛС обнаружения ВЦ малой и средней дальности действия. Параметры указанных РЛС приведены в таблице 2.1, раздел 2.

При моделировании для всех рассматриваемых вариантов принято, что антенное полотно РЛС фиксировано на поворотной платформе относительно горизонта.

При моделировании в качестве исходных данных использованы обобщенные типовые технические характеристики средств РТР [31, 35, 54, 56, 65], а также технические характеристики станции РТР "Синтез" [31]. Указанные характеристики приведены в таблицах 4.1 и 4.2.

Таблица 4.1 - Типовые технические характеристики средств РТР

Параметр	Значение
Рабочий диапазон частот, ГГц	0,1...40
Коэффициент шума приемника, дБ	10...14
Динамический диапазон, дБ	45...95
Избирательность, дБ	50...60
Полоса мгновенного обзора, МГц	200...1000
Чувствительность, дБВт	-95...-125
Пороговое отношение сигнал/шум, дБ	10...15
Точность пеленгования (СКО), град	0,5...6

Таблица 4.2 - Технические характеристики станции РТР "Синтез"

Параметр	Значение
Рабочий диапазон частот, ГГц	0,1...18
Динамический диапазон, дБ	45
Полоса мгновенного обзора, МГц	1000
Точность пеленгования (СКО), град	6

При расчётах принято, что диаграмма направленности антенны средства РТР ориентирована точно на РЛС, так как данный случай является наименее благоприятным для защищаемого РЛС.

Характеристики САП, использованные при моделировании, выбраны на основании анализа результатов расчетов п. 2.2.2.

### 4.2.3 Шумовая маскировка с помощью САП, встроенного в антенно-передающий тракт РЛС

Для данного варианта организации радиоподавления средств РТР в интересах защиты РЛС рассмотрены следующие сценарий ведения РТР:

1) РТР с расстояния, не превышающего дальность прямой видимости относительно РЛС (Рисунок 4.3, а).

2) РТР с небольших расстояний, характерных для малых тактических БПЛА (Рисунок 4.3, б).

При моделировании использованы следующие исходные данные.

Расположение каждого РЭС при проведении модельного эксперимента для варианта шумовой маскировки с помощью САП, встроенного в антенно-передающий тракт РЛС, в прямоугольной системе координат приведено в таблице 4.3.

Таблица 4.3 - Расположение РЭС

РЭС	X, км	Y, км	Z, км
РЛС, САП	300	300	0,005
СРТР сценарий (1)	300	600	10
СРТР сценарий (2)	300	329,2	7

Таким образом, расстояние между защищаемым РЛС и подавляемым СРТР для сценариев 1 и 2 выбрано, соответственно,  $R_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}}=300$  км и  $R_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}}=30$  км. Указанные сценарии РТР поясняются на рисунке 4.3.

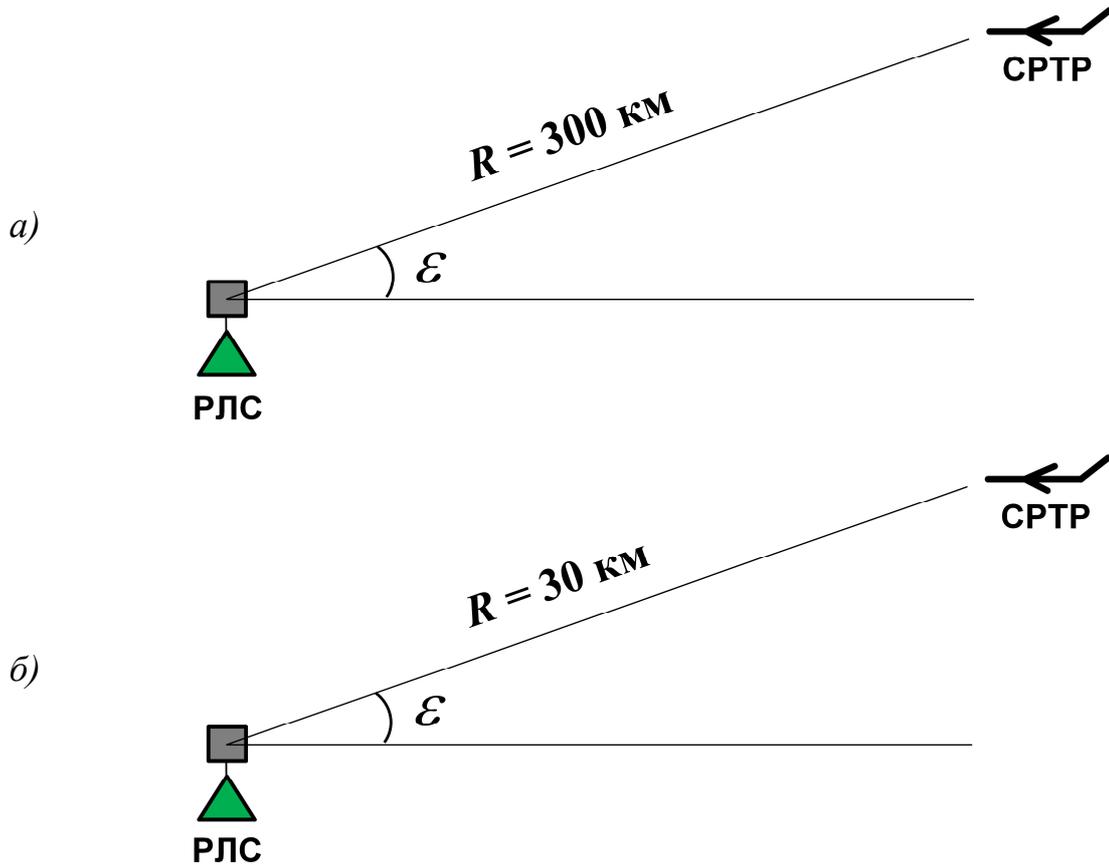


Рисунок 4.3 - Сценарии ведения РТР при проведении модельного эксперимента  
 а) сценарий 1 - РТР с дальностей, определяемых прямой видимостью;  
 б) сценарий 2 - РТР с небольших расстояний.

Параметры подавляемого средства РТР:

- коэффициент усиления (КУ) антенны  $G_{\text{СРТР}} = 12$  дБ;
- ширина ДН антенны в горизонтальной плоскости  $\Delta\beta_{\text{СРТР}} = 60^\circ$ ;
- ширина ДН антенны в вертикальной плоскости  $\Delta\varepsilon_{\text{СРТР}} = 30^\circ$ .

Для варианта шумовой маскировки с помощью САП, встроенного в антенно-передающий тракт РЛС в качестве параметра САП в соответствии с п. 3.2.1 принимается  $q_{\text{ШИ/ЗИ}}^2$ . При подстановке исходных данных соотношение (4.2) в рассматриваемом варианте упрощается и приводится к виду

$$\frac{P_{\text{САП}}}{P_{\text{РЛС}}} = q_{\text{ШИ/ЗИ}}^2 \geq K_{\text{под}} (\text{ПК}_{\text{треб}}),$$

следовательно, в данном случае принимается  $q_{\text{ШИ/ЗИ}}^2 = 1$ .

Ниже приведены результаты модельного эксперимента (ИЭС и УПЭС) для варианта шумовой маскировки с помощью САП, встроенного в антенно-передающий тракт РЛС.

На рисунках 4.4 - 4.7 приведены УПЭС при различных расстояниях между защищаемым РЛС и подавляемым СРТР для РЛС малой и средней дальности при наличии и без шумового прикрытия.

Из рисунков 4.4 - 4.7 (а) видно, что в отсутствие САП имеет место практически полное отсутствие скрытия РЛС от средств РТР (это подтверждается тем, что показатель ИЭС стремится к нулю). При этом, как видно из рисунков 4.4 - 4.7 (б), применение САП, встроенного в антенно-передающий тракт РЛС, во всех рассмотренных конфигурациях приводит к полному энергетическому скрытию излучения РЛС во всей рассматриваемой угловой зоне (ИЭС=100%).

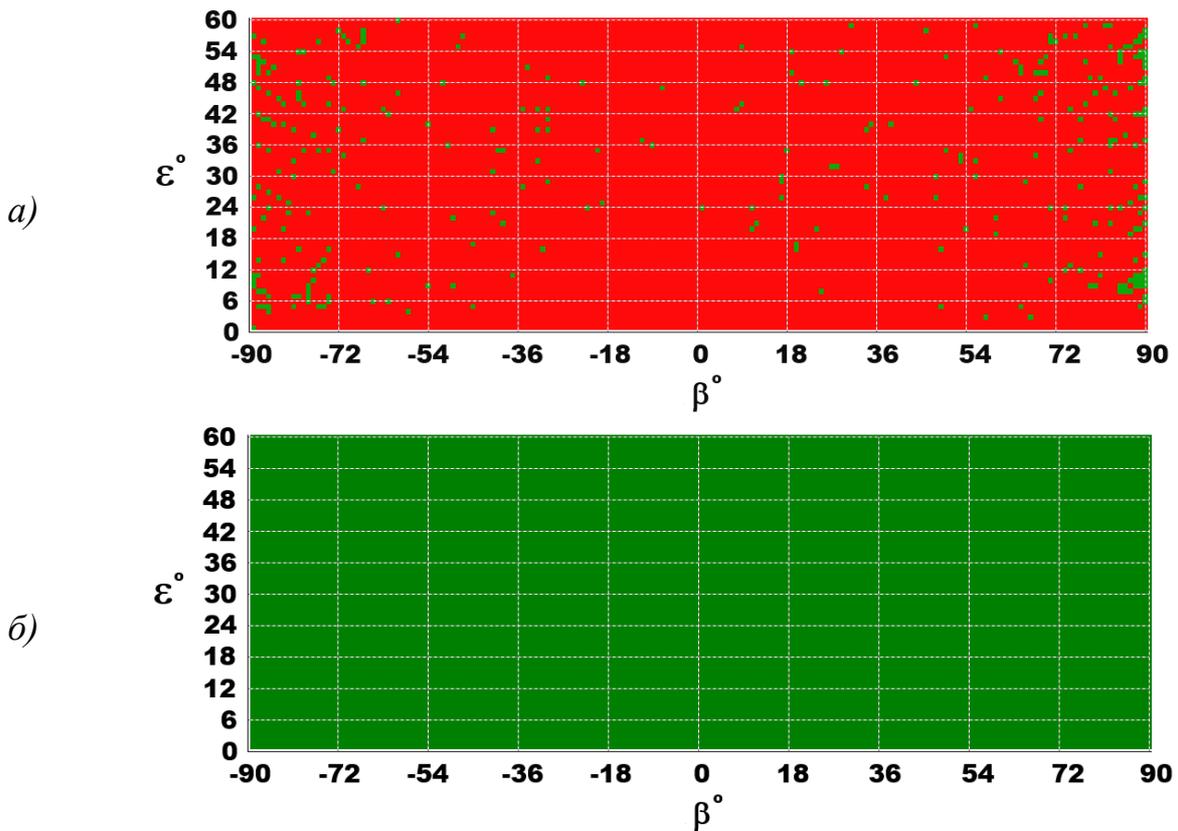


Рисунок 4.4 - УПЭС для РЛС малой дальности при  $R_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}} = 300$  км:  
 а) без шумового прикрытия (ИЭС=2,9%); б) при наличии шумового прикрытия (ИЭС=100%)

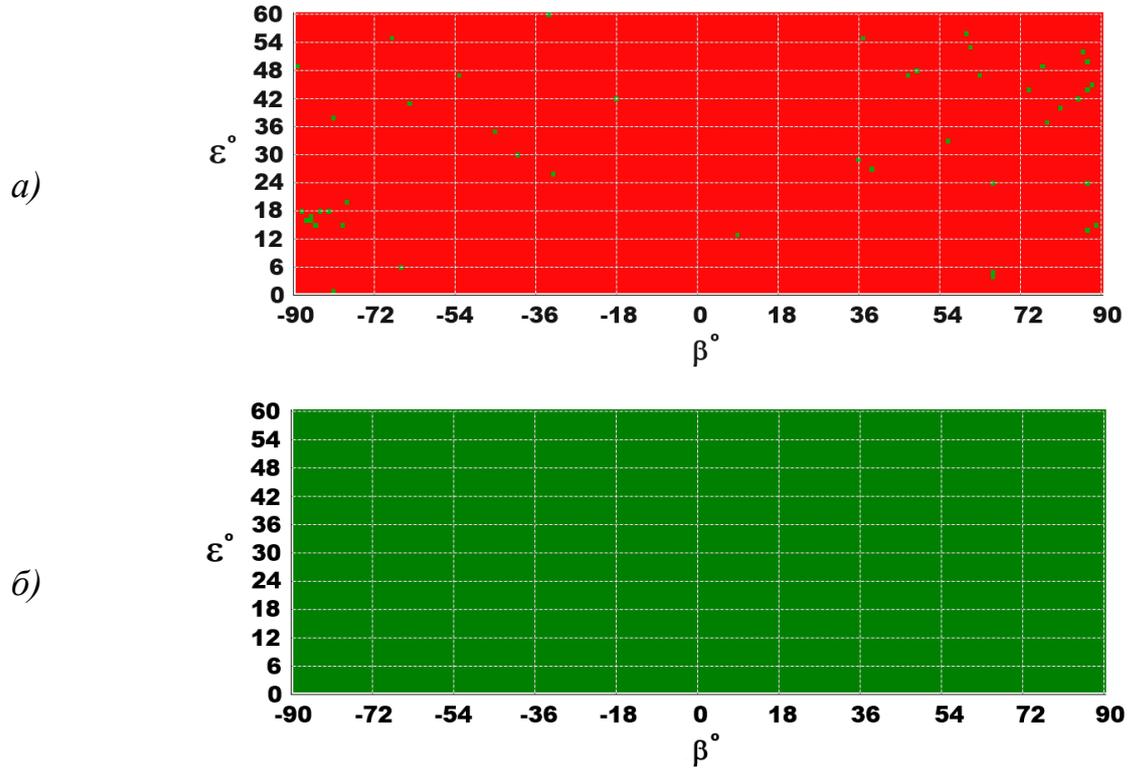


Рисунок 4.5 - УПЭС для РЛС средней дальности при  $R_{\text{РЛС}}^{\text{СРПР}} = 300$  км:  
*a)* без шумового прикрытия (ИЭС=0,4%); *б)* при наличии шумового прикрытия (ИЭС=100%)

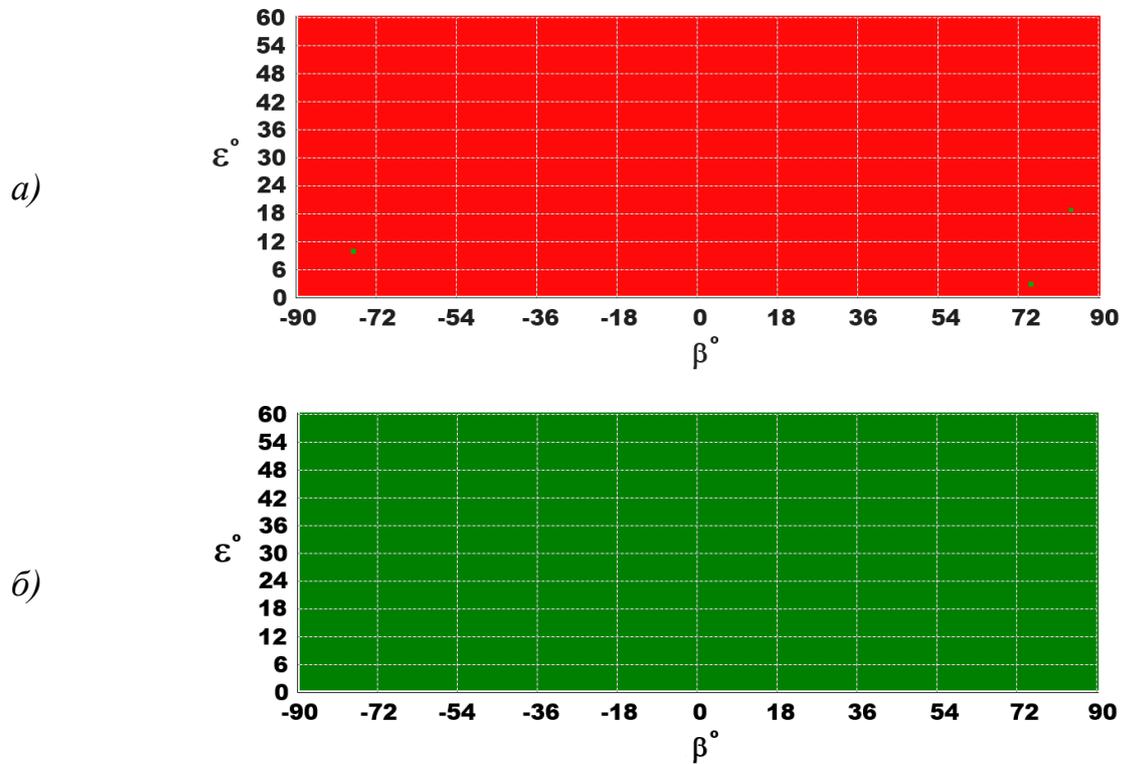


Рисунок 4.6 - УПЭС для РЛС малой дальности при  $R_{\text{РЛС}}^{\text{СРПР}} = 30$  км:  
*a)* без шумового прикрытия (ИЭС=0,01%); *б)* при наличии шумового прикрытия (ИЭС=100%)

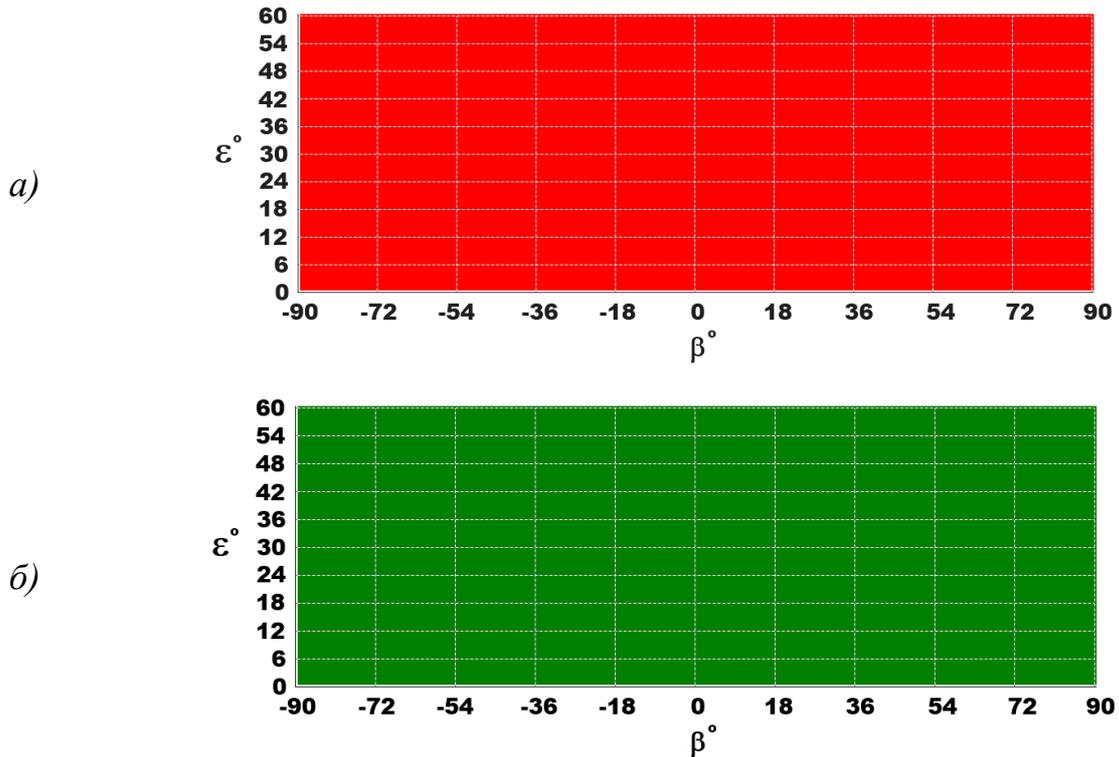


Рисунок 4.7 - УПЭС для РЛС средней дальности при  $R_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}} = 30$  км:  
 а) без шумового прикryтия (ИЭС=0%); б) при наличии шумового прикryтия (ИЭС=100%)

Анализ результатов модельного эксперимента для варианта шумовой маскировки с помощью САП, встроенного в антенно-передающий тракт РЛС позволяет сделать следующие выводы.

1. В случае, где САП шумового прикryтия не применяется, энергетическая скрытность РЛС стремится к нулю. При этом, при прочих равных условиях РЛС малой дальности имеет несколько более высокий ИЭС по сравнению с РЛС средней дальности, что обусловлено разницей в уровнях мощности излучения данных типов РЛС.

2. Применение САП, встроенного в антенно-передающий тракт РЛС, во всех рассмотренных конфигурациях приводит к полному энергетическому скryтию излучения РЛС во всей зоне обзора (ИЭС=100%) вне зависимости от типа РЛС и расстояния между РЛС и СРТР.

#### 4.2.4 Шумовая маскировка бокового излучения РЛС с помощью САП, размещаемых на позиции РЛС

Для данного варианта организации радиоподавления средств РТР в интересах защиты РЛС применены сценарий ведения РТР, аналогичные рассмотренным в п. 4.2.3.

При моделировании применены следующие исходные данные.

Расположение каждого РЭС при проведении модельного эксперимента для варианта шумовой маскировки бокового излучения РЛС с помощью САП, размещаемых на позиции РЛС, в прямоугольной системе координат приведено в таблице 4.4.

Таблица 4.4 - Расположение РЭС

РЭС	X, км	Y, км	Z, км
РЛС	300	300	0,005
САП <sub>1</sub>	301	301	0,005
САП <sub>2</sub>	299	301	0,005
САП <sub>3</sub>	299	299	0,005
САП <sub>4</sub>	301	299	0,005
СРТР сценарий (1)	300	600	10
СРТР сценарий (2)	300	329,2	7

Расстояние между защищаемым РЛС и подавляемым СРТР согласно рассмотренным в п. 4.2.3 сценариям, соответственно,  $R_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}}=300$  км и  $R_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}}=30$  км.

Параметры подавляемого СРТР:

- КУ антенны  $G_{\text{СРТР}} = 12$  дБ;
- ширина ДН антенны в горизонтальной плоскости  $\Delta\beta_{\text{СРТР}} = 60^\circ$ ;
- ширина ДН антенны в вертикальной плоскости  $\Delta\varepsilon_{\text{СРТР}} = 30^\circ$ .

Параметры применяемых САП приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 - Параметры САП

Параметры	САП <sub>1</sub>	САП <sub>2</sub>	САП <sub>3</sub>	САП <sub>4</sub>
Мощность, кВт	15	15	15	15
КУ антенны, дБ	10	10	10	10
Ширина ДН антенны в горизонтальной плоскости, град	90	90	90	90
Ширина ДН антенны в вертикальной плоскости, град	30	30	30	30
Ориентация ДН антенны по азимуту (относительно оси Y), град	45	-45	-135	135
Ориентация ДН антенны по углу места (относительно горизонтальной плоскости), град	15	15	15	15

Ниже приведены результаты модельного эксперимента (ИЭС и УПЭС) для варианта шумовой маскировки бокового излучения РЛС с помощью САП, размещаемых на позиции РЛС.

На рисунках 4.8 - 4.11 приведены УПЭС при различных расстояниях между защищаемым РЛС и подавляемым СРТР для РЛС малой и средней дальности без применения и с применением шумового прикрытия.

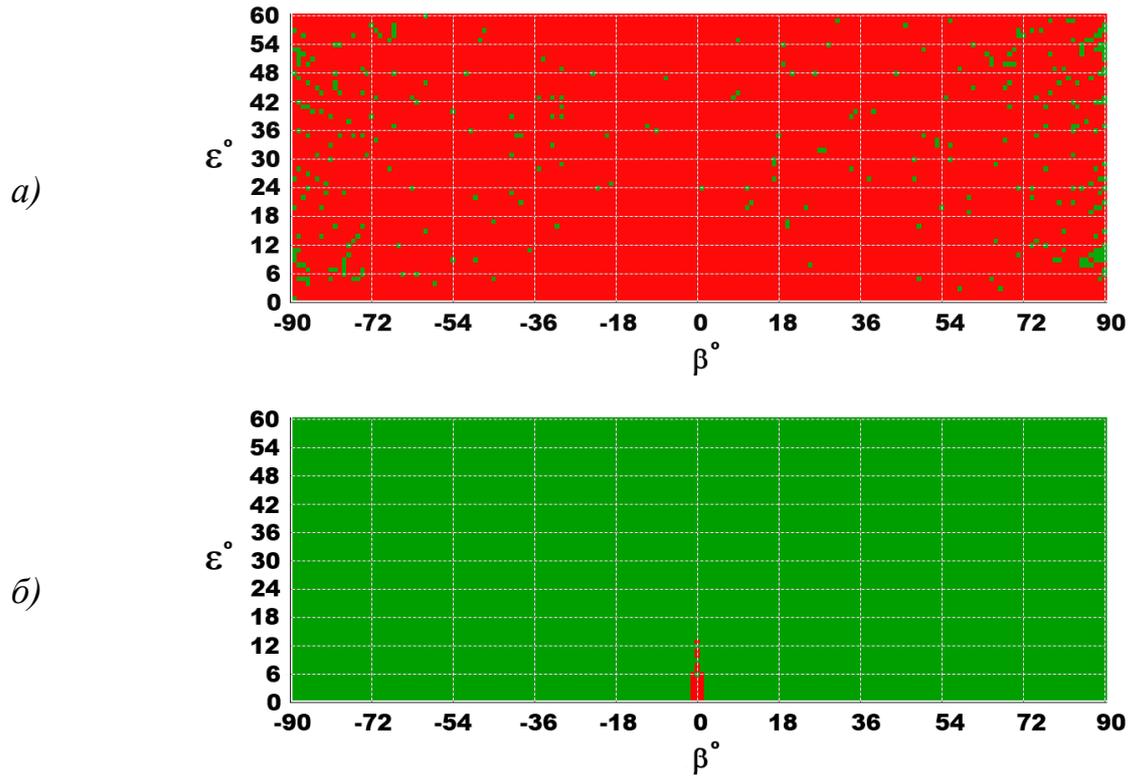


Рисунок 4.8 - УПЭС для РЛС малой дальности при  $R_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}} = 300$  км:  
*a)* без шумового прикрития (ИЭС=2,9%); *б)* при наличии шумового прикрития (ИЭС=99,8%)

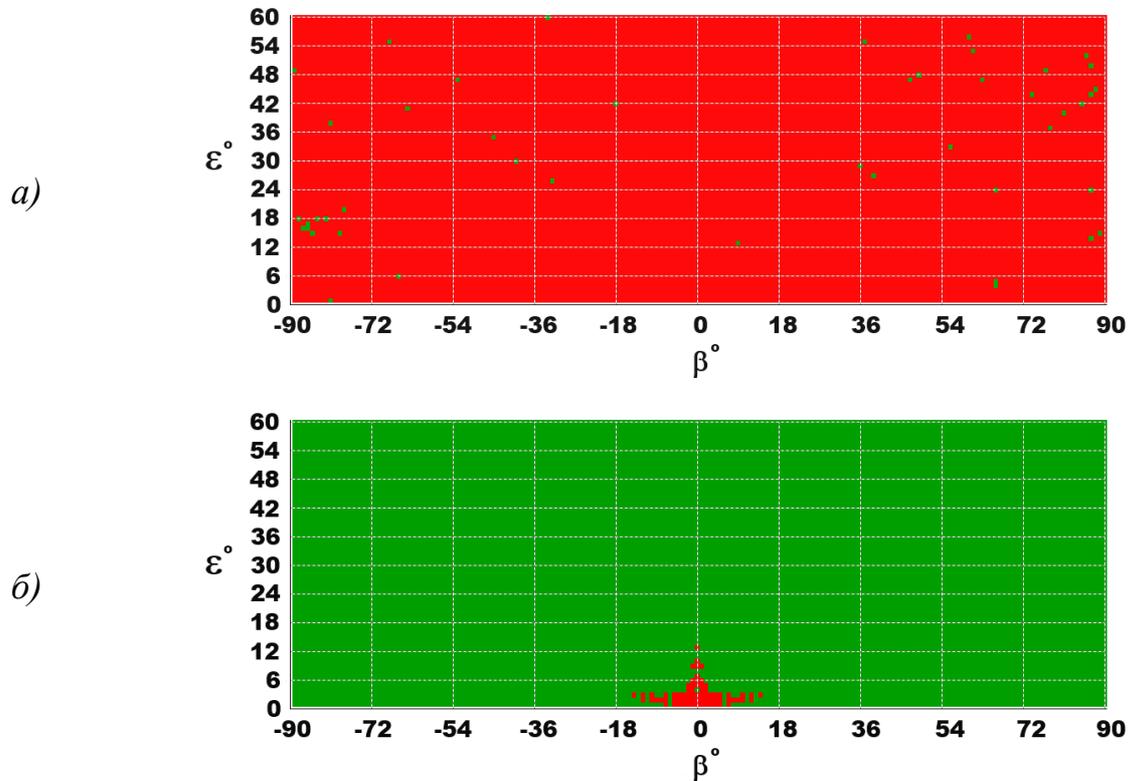


Рисунок 4.9 - УПЭС для РЛС средней дальности при  $R_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}} = 300$  км:  
*a)* без шумового прикрития (ИЭС=0,4%); *б)* при наличии шумового прикрития (ИЭС=99,3%)

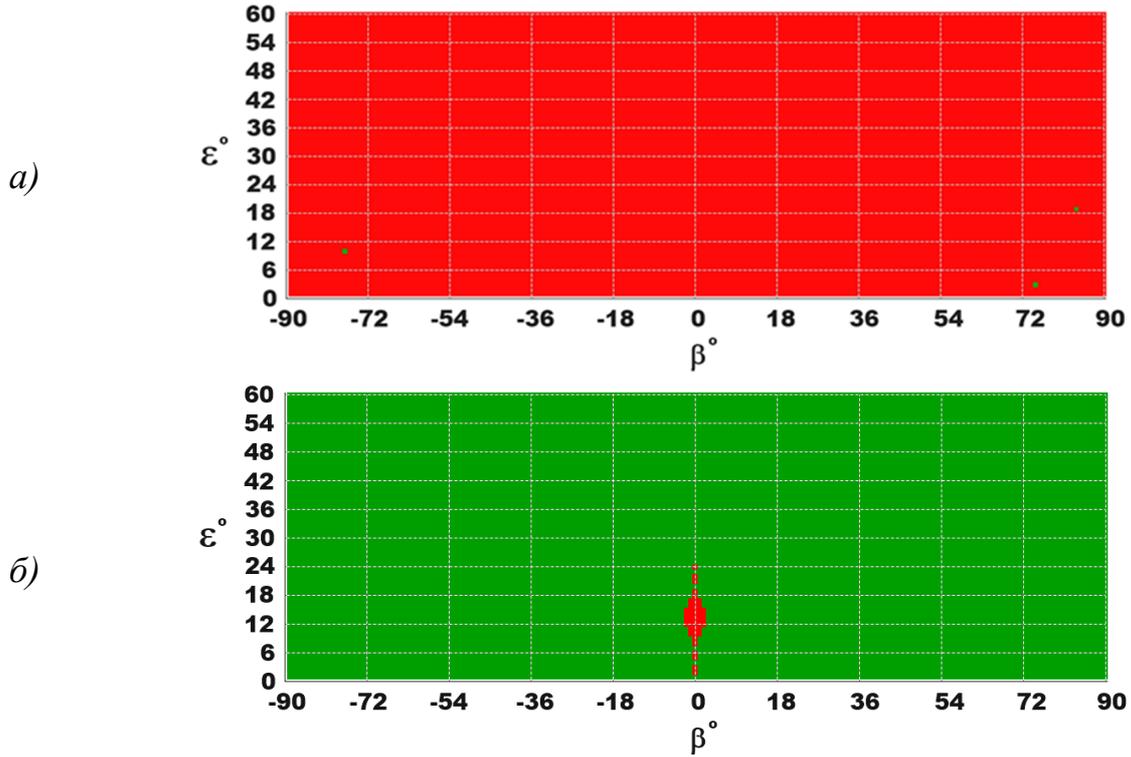


Рисунок 4.10 - УПЭС для РЛС малой дальности при  $R_{\text{РЛС}}^{\text{CPTP}} = 30$  км:  
 а) без шумового прикрития (ИЭС=0,01%); б) при наличии шумового прикрития (ИЭС=99,6%)

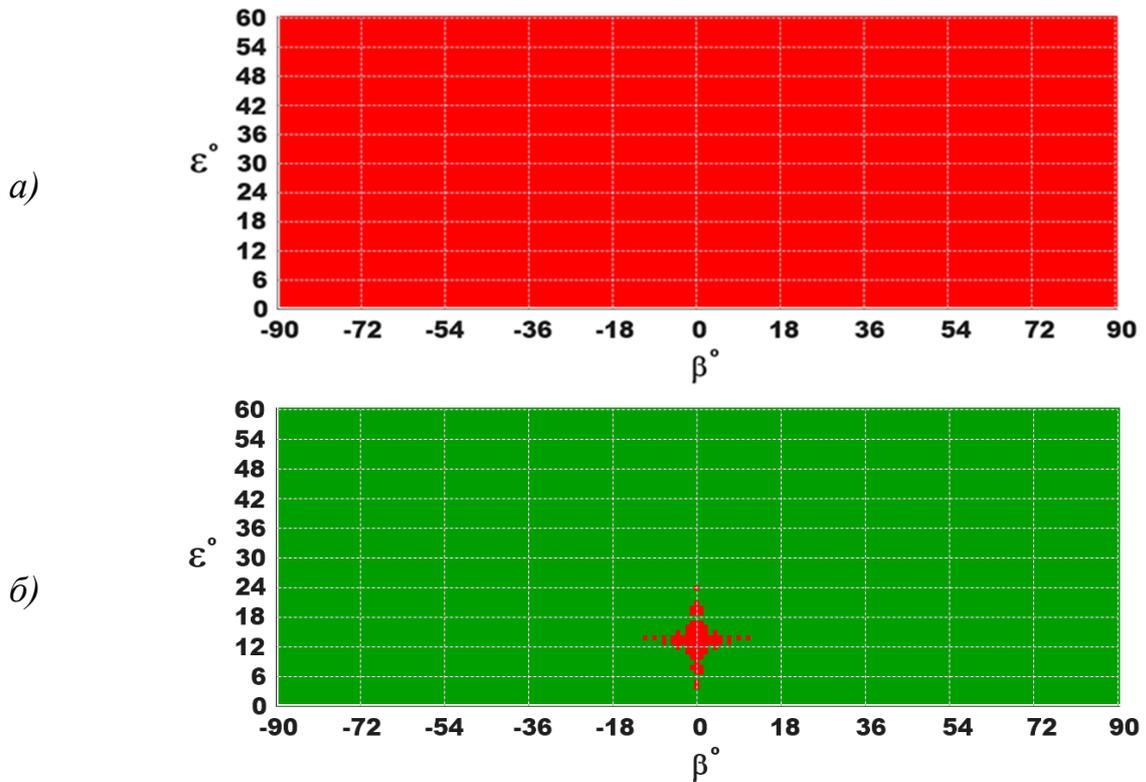


Рисунок 4.11 - УПЭС для РЛС средней дальности при  $R_{\text{РЛС}}^{\text{CPTP}} = 30$  км:  
 а) без шумового прикрития (ИЭС=0%); б) при наличии шумового прикрития (ИЭС=99,3%)

Из рисунков 4.8 - 4.11 (б) видно, что применение САП, размещаемых на позиции РЛС, с целью шумовой маскировки бокового излучения во всех рассмотренных конфигурациях приводит к высоким показателям энергетической скрытности излучения (ИЭС в пределах от 99,3% до 99,98%). При этом, «красная» область УПЭС, в пределах которой излучение РЛС может быть обнаружено средством РТР, расположенным в заданной точке пространства, отличается по форме для различных типов РЛС. Данное обстоятельство вызвано различием параметров рассматриваемых РЛС, а именно, мощности излучения и ширины ДН в главных плоскостях. Так для РЛС средней дальности ширина ДН по азимуту в два раза больше чем для РЛС малой дальности. В свою очередь, для РЛС малой дальности ширина ДН по углу места в два раза больше чем для РЛС средней дальности. При этом, импульсная мощность излучения РЛС средней дальности в 3,33 раза превышает импульсную мощность РЛС малой дальности.

Выше были приведены графические изображения УПЭС со значениями ИЭС для одного значения коэффициента подавления приемника СРТР (в случае шумового прикрития) или чувствительности приемника СРТР (без шумового прикрития) при фиксированном положении СРТР по отношению к защищаемому РЛС (т.е.  $R_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}} = \text{const}$ ). Далее приведены результаты модельного эксперимента, в котором изменялось расстояние  $R_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}}$  при фиксированном положении РЛС и САП (см. таблицу 4.3), а также при фиксированном угле визирования РЛС-СРТР (см. рисунок 4.12). При этом, соответствующие значения коэффициентов усиления антенн РЛС и СРТР не изменялись ( $G_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}} = \text{const}$  и  $G_{\text{СРТР}}^{\text{РЛС}} = \text{const}$ ), но изменялись параметры чувствительности  $W_{\text{СРТР}}$  приемника СРТР (без шумового прикрития) или коэффициента подавления  $K_{\text{под}}(\text{ПК}_{\text{треб}})$  приемника СРТР (в случае применения шумового прикрития).

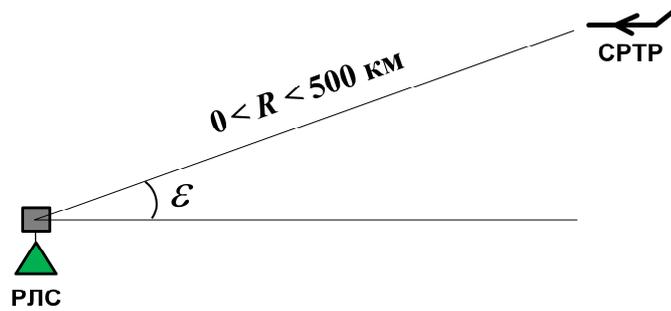


Рисунок 4.12 - Положение СРТР относительно РЛС при моделировании

На рисунках 4.13, 4.14 приводятся соответствующие семейства графиков зависимостей ИЭС от  $R_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}}$  для РЛС малой и средней дальности действия. Приведенные ниже данные позволяют получить более полное представление об уровне энергетической скрытности защищаемого РЛС в рамках рассматриваемой задачи.

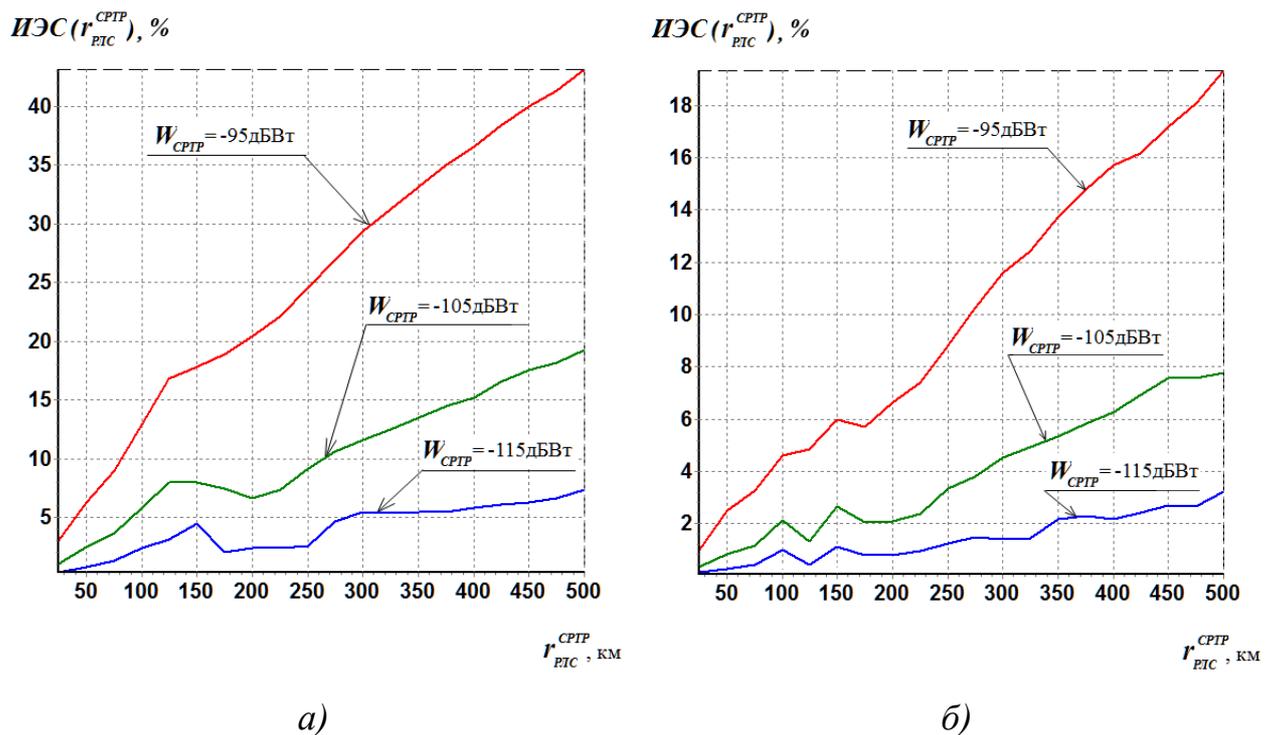


Рисунок 4.13 - Семейство графиков зависимости ИЭС от  $R_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}}$  при различных значениях  $W_{\text{СРТР}}$  без шумового прикryтия  
 а) РЛС малой дальности; б) РЛС средней дальности

Из рисунка 4.13 видно, что при увеличении расстояния  $R_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}}$  до 500 км при прочих равных условиях при отсутствии САП для  $W_{\text{СРТР}} = -95$  дБВт ИЭС

не превышает 42% для РЛС малой дальности, а для РЛС средней дальности составляет ~19%. При увеличении  $W_{\text{СРТР}}$  чувствительности приемника СРТР на 10 дБВт для РЛС как малой, так и средней дальности ИЭС уменьшается приблизительно в два раза при прочих равных условиях. При увеличении чувствительности  $W_{\text{СРТР}}$  до уровня  $-115$  дБВт как для РЛС малой дальности ИЭС, так и для РЛС средней дальности ИЭС не превышает единиц процентов. Указанные аргументы позволяют сделать вывод о низком уровне энергетической скрытности РЛС рассматриваемых типов при отсутствии средств шумового прикрытия, предназначенных для защиты РЛС от средств РТР.

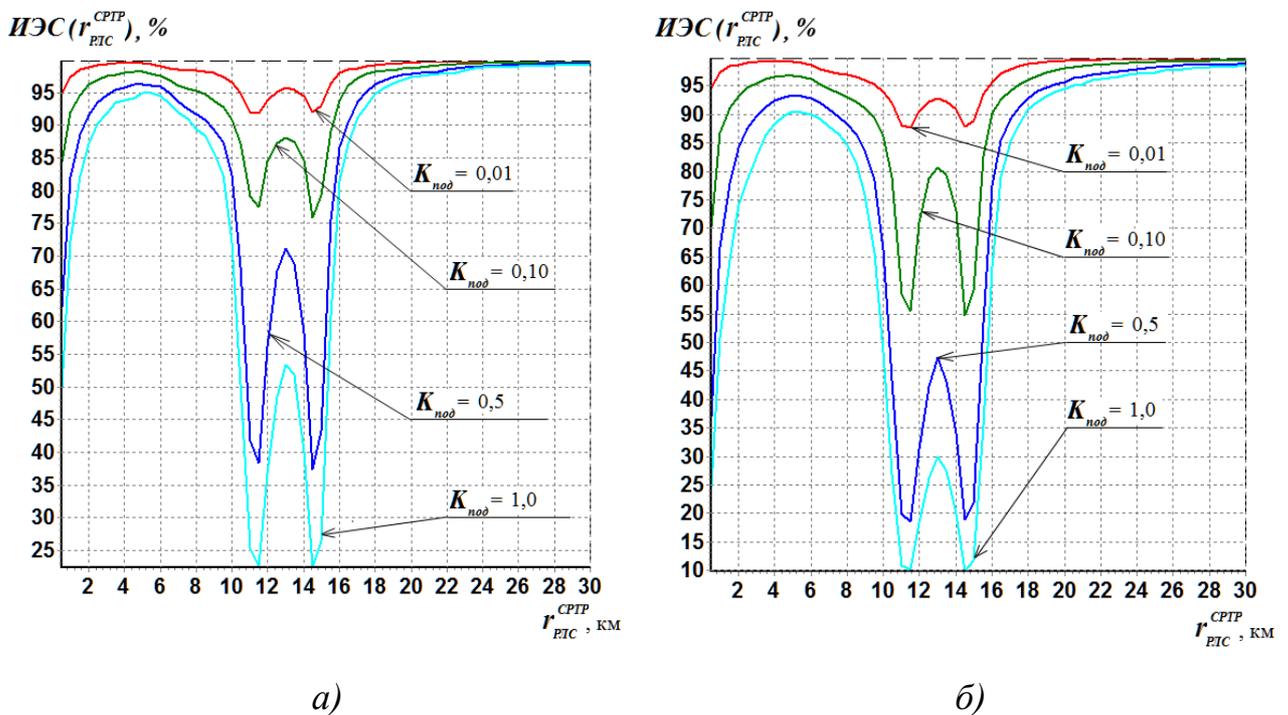


Рисунок 4.14 - Семейство графиков зависимости ИЭС от  $R_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}}$  при различных значениях  $K_{\text{под}}$  (ПК<sub>треб</sub>) при наличии шумового прикрытия  
 а) РЛС малой дальности; б) РЛС средней дальности

Из рисунка 4.14 видно, что в случае применения САП при прочих равных условиях как для РЛС малой дальности, так и для РЛС средней дальности при увеличении расстояния  $R_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}}$  до 30 км и более ИЭС стремится к 100%, при этом в окрестностях  $R_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}} = 10,5$  км и  $R_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}} = 12,5$  км

наблюдаются «провалы» ИЭС. Уменьшение значения  $K_{\text{под}}(\text{ПК}_{\text{треб}})$  влечет увеличение ИЭС. Указанные обстоятельства обуславливаются пространственным положением БЛ ДН антенн РЛС. При размещении СРТР в области БЛ ДН антенны РЛС мощность сигнала РЛС на входе приемника СРТР увеличивается, вследствие чего ИЭС снижается до значений  $\sim 23\%$  для РЛС малой дальности и до  $10\%$  для РЛС средней дальности. При уменьшении значения  $R_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}}$  от 5 км до нуля значения ИЭС изменяются от 95-100% до нуля для РЛС малой дальности и от 87-100% до нуля для РЛС средней дальности.

Анализ результатов модельного эксперимента для варианта шумовой маскировки бокового излучения РЛС с помощью САП, размещаемых на позиции РЛС позволяет сделать следующие выводы.

1. Применение САП, размещаемых на позиции РЛС, во всех рассмотренных конфигурациях позволяет достичь высоких показателей энергетической скрытности (ИЭС в пределах от 99,3% до 99,8%).

2. Для РЛС малой дальности при прочих равных условиях, достигаются более высокие показатели энергетической скрытности по сравнению с РЛС средней дальности, что обусловлено более низким уровнем мощности.

3. При уменьшении расстояния между РЛС и СРТР в 10 раз при прочих равных условиях ИЭС уменьшается на 0,2% для РЛС малой дальности и не изменяется для РЛС средней дальности.

4. Шумовая маскировка с помощью САП, размещаемых на позиции РЛС, не обеспечиваеткрытие излучения в области главного и ближних боковых лепестков ДН антенны РЛС, что более явным образом проявляется для РЛС средней дальности.

5. Применение САП шумовой маскировки излучения, размещаемых на позиции РЛС, позволяет обеспечить высокий уровень энергетической скрытности РЛС от средств РТР, что свидетельствует об эффективности предложенного способа защиты РЛС.

#### 4.2.5 Шумовая маскировка бокового излучения РЛС от орбитальных средств РТР

Для данного варианта организации радиоподавления средств РТР в интересах защиты РЛС рассмотрен сценарий РТР, описанный в разделе 3.4.

При моделировании применены следующие исходные данные.

Расположение каждого РЭС при проведении модельного эксперимента для варианта шумовой маскировки от орбитальных средств РТР, в прямоугольной системе координат приведено в таблице 4.6.

Таблица 4.6 - Расположение РЭС

РЭС	X, км	Y, км	Z, км
РЛС	300	300	0,005
САП	300	310	0,005
СРТР	300	450	260

Расстояние между защищаемым РЛС и подавляемым СРТР составляет,  $R_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}} = 300$  км, что соответствует сценарию разведки с низкоорбитального космического аппарата (КА) [54]. Указанный сценарий поясняется на рисунке 4.15.

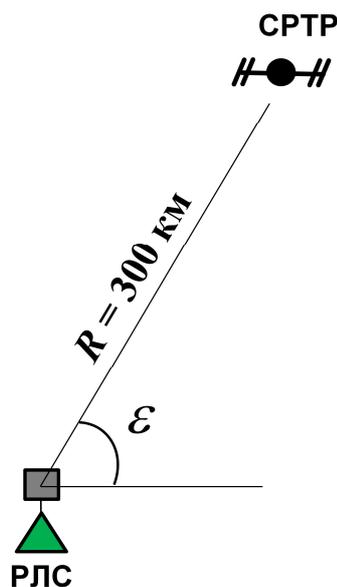


Рисунок 4.15 - Сценарий орбитальной РТР

Параметры подавляемого средства РТР:

- КУ антенны  $G_{\text{СРТР}} = 4,5$  дБ;
- ширина ДН антенны в горизонтальной плоскости  $\Delta\beta_{\text{СРТР}} = 90^\circ$ ;
- ширина ДН антенны в вертикальной плоскости  $\Delta\varepsilon_{\text{СРТР}} = 90^\circ$ ;
- антенна направлена на защищаемую РЛС.

Параметры применяемого САП:

- мощность  $P_{\text{САП}} = 15$  кВт;
- КУ антенны  $G_{\text{САП}} = 4,5$  дБ
- ширина ДН антенны в горизонтальной плоскости  $\Delta\beta_{\text{САП}} = 90^\circ$ ;
- ширина ДН антенны в вертикальной плоскости  $\Delta\varepsilon_{\text{САП}} = 90^\circ$ ;
- антенна направлена в верхнюю полусферу.

Ниже приведены результаты модельного эксперимента (ИЭС и УПЭС) для варианта шумовой маскировки от орбитальных средств РТР.

На рисунках 4.16, 4.17 приведены УПЭС при различных расстояниях между защищаемым РЛС и СРТР для РЛС малой (рисунок 4.16) и средней (рисунок 4.17) дальности без применения и с применением САП.

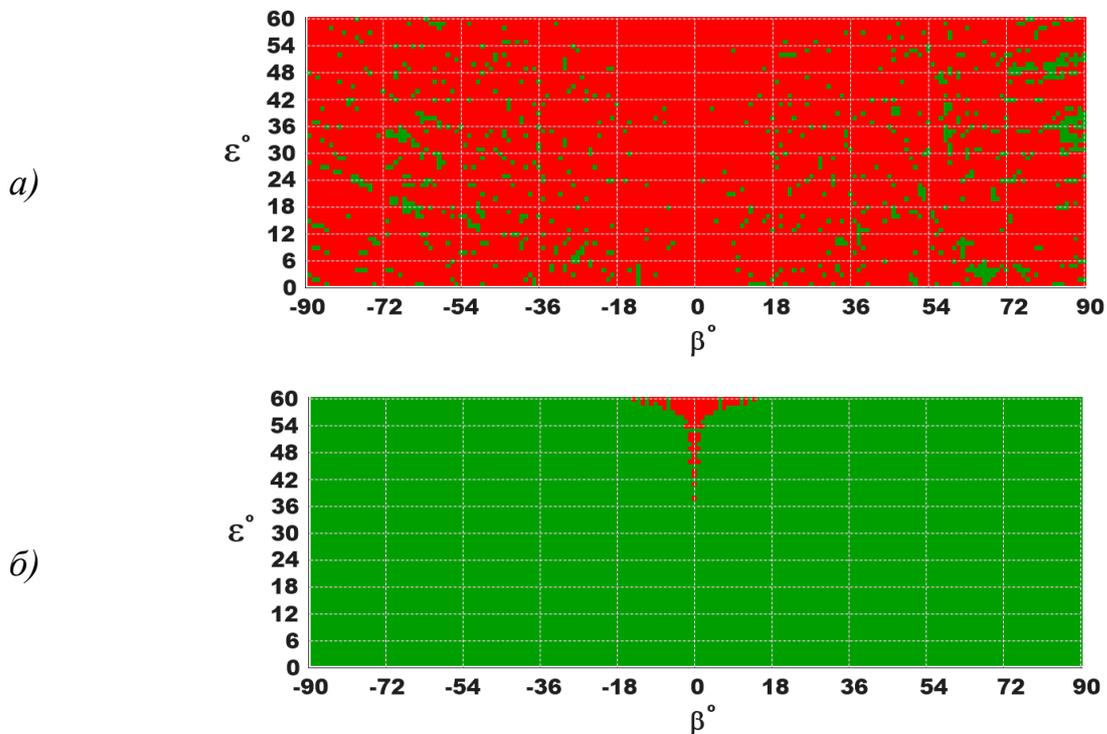


Рисунок 4.16 - УПЭС для РЛС малой дальности при  $R_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}} = 300$  км:  
*а)* без шумового прикryтия (ИЭС=7,7%); *б)* при наличии шумового прикryтия (ИЭС=99,1%)

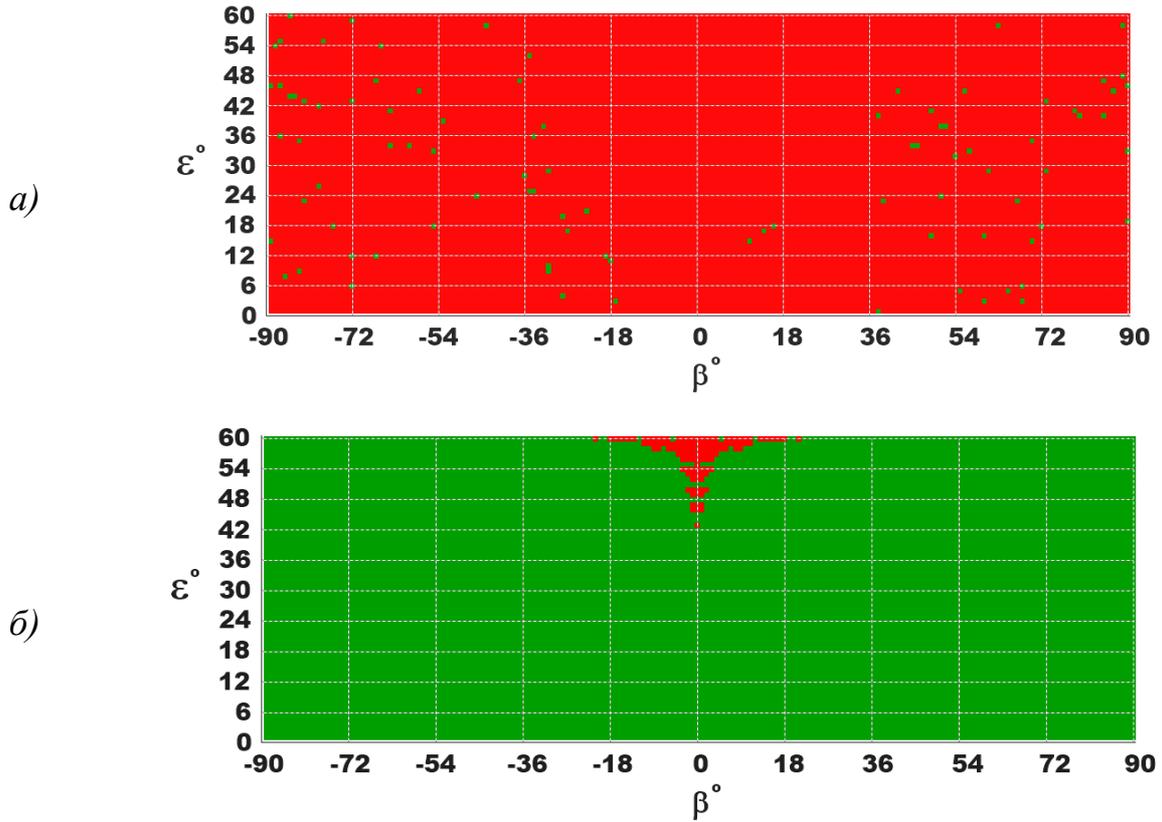


Рисунок 4.17 - УПЭС для РЛС средней дальности при  $R_{\text{РЛС}}^{\text{СРТР}} = 300$  км:  
 а) без шумового прикрытия (ИЭС=0,9%); б) при наличии шумового прикрытия (ИЭС=98,9%)

Анализ результатов модельного эксперимента для варианта шумовой маскировки бокового излучения РЛС от орбитальных средств РТР позволяет сделать следующие выводы.

1. В случае отсутствия шумового прикрытия при ведении РТР с низкоорбитальных КА РЛС имеет низкую скрытность излучения (ИЭС составляет для РЛС малой дальности 7,7%, а для РЛС средней дальности равен 0,9%).

2. Применение внешних САП, размещаемых на небольшом удалении от РЛС, позволяет достичь высоких показателей энергетической скрытности (ИЭС в пределах от 99,1% до 98,9% в зависимости от типа РЛС).

#### **Выводы по разделу 4**

На базе разработанной системы количественных показателей эффективности методом модельного эксперимента выполнен анализ эффективности защиты РЛС от средств РТР с использованием предложенных в диссертации способов защиты.

В случае применения традиционных методов защиты РЛС от средств РТР, таких как, например, использование широкополосных ФКМ и ЛЧМ сигналов, не обеспечивает достаточные уровни скрытности РЛС, что подтверждается результатами проведенных модельных экспериментов, в которых САП шумового прикryтия не применяется (энергетическая скрытность РЛС стремится к нулю, см. пп. 4.2.3-4.2.5). Достоверность приведенного вывода подтверждается результатами научных работ других авторов [16, 37].

Следует отметить, что применение в РЛС шумоподобных сигналов в качестве мер защиты от средств РТР, как-правило, позволяет решить задачу повышения скрытности РЛС [31]. Тем не менее, применение шумоподобных сигналов в РЛС рассматриваемых в настоящей работе типов (см. таблицу 2.1, раздел 2) не позволяет решать функциональные задачи РЛС, а именно обнаруживать цели на приемлемых для ПВО дальностях [69].

В случае применения шумовой маскировки с помощью САП, встроенного в антенно-передающий тракт РЛС, во всех рассмотренных конфигурациях обеспечивается полное энергетическое скryтие излучения РЛС во всей рассматриваемой угловой зоне.

В случае применения шумовой маскировки с помощью САП, размещаемых на позиции защищаемого РЛС, достигаются высокие уровни энергетической скрытности (ИЭС в пределах от 99,3% до 99,8%) в области дальних и средних боковых лепестков ДН антенны РЛС.

Рассмотрение результатов модельного эксперимента для варианта шумовой маскировки бокового излучения РЛС от орбитальных средств РТР позволяет сделать следующие выводы:

– в случае отсутствия шумового прикрытия при ведении РТР с низкоорбитальных КА РЛС имеет низкую скрытность излучения (ИЭС составляет для РЛС малой дальности 7,7%, а для РЛС средней дальности равен 0,9%).

– применение внешних САП, размещаемых на небольшом удалении от РЛС, позволяет достичь высоких показателей энергетической скрытности (ИЭС в пределах от 99,1% до 98,9% в зависимости от типа РЛС).

Результаты анализа модельного эксперимента подтверждают высокую эффективность разработанных в диссертации технически реализуемых предложений по способам защиты РЛС от средств РТР.

## Заключение

В ходе проведения диссертационного исследования получены следующие основные результаты:

1. Определены содержание и возможные пути организации противодействия средствам РТР методами радиоподавления в интересах защиты РЛС.

2. Выявлены технические трудности, возникающие при реализации радиоподавления средств РТР в интересах защиты РЛС средствами радиоподавления, и предложены варианты преодоления этих трудностей.

3. Разработаны технически реализуемые предложения по построению радиолокационно-помехового комплекса, обладающего повышенной защищенностью от средств РТР, электромагнитной совместимостью компонентов, реализуемым энергопотреблением и приемлемым уменьшением дальности радиолокации, основанные на использовании:

- способов шумовой маскировки излучения РЛС накрывающего или ответного типов;

- «мертвой зоны» РЛС для организации шумовой маскировки зондирующего и бокового излучения РЛС;

- средств шумовой маскировки излучения защищаемого РЛС, встроенных в антенно-передающий тракт РЛС;

- средств шумовой маскировки излучения защищаемого РЛС, расположенных на позиции РЛС;

- средств имитации излучения РЛС.

4. Выполнен анализ эффективности защиты РЛС от средств РТР с использованием предложенных в диссертации способов защиты методами модельного эксперимента на базе разработанной в диссертации системы количественных показателей эффективности. Результаты анализа подтверждают высокую эффективность разработанных в диссертации технически реализуемых предложений по способам защиты РЛС от средств РТР.

### Список сокращений и условных обозначений

АМП	–	активная маскирующая радиопомеха
АУХ	–	амплитудно-угловая характеристика
БЛ	–	боковые лепестки
ВЦ	–	воздушная цель
ГЛ	–	главный лепесток
ДН	–	диаграмма направленности
ЗИ	–	зондирующий импульс
ЗМИ	–	зона маскировки излучения
ЗРК	–	зенитный ракетный комплекс
ЗС	–	зондирующий сигнал
ИИ	–	источник излучения
ИРИ	–	импульс рабочего излучения (зондирующего или бокового)
ИЭС	–	индекс энергетической скрытности
КЛА	–	космический летательный аппарат
КУ	–	коэффициент усиления
ЛА	–	летательный аппарат
ЛЧМ	–	линейно-частотно-модулированный (сигнал)
МШ	–	маскирующий шум
ПВО	–	противовоздушная оборона
ПРУР	–	противорадиолокационная управляемая ракета
ПУОП	–	повышенный уровень ошибок пеленгования
РЛС	–	радиолокационное средство
РП	–	радиопеленгатор
РТР	–	радиотехническая разведка
РЭБ	–	радиоэлектронная борьба
РЭС	–	радиоэлектронное средство
САП	–	средство активных радиопомех
СКО	–	среднеквадратическое отклонение
СРТР	–	средство радиотехнической разведки
УПОП	–	угловая панорама ошибок пеленгования
УПЭС	–	угловая панорама энергетической скрытности
ФАР	–	фазированная антенная решетка
ФКМ	–	фазокодманипулированный (сигнал)
ФУХ	–	фазоугловая характеристика
ШИ	–	шумовой импульс
ШП	–	шумовая помеха
ЭМС	–	электромагнитная совместимость
ЭС	–	эхосигнал
ЭШ	–	эхошум

### Список литературы

1. Александров, М.С. Точностные характеристики пеленгационного и разностно-дальномерного методов пассивной грозолокации / М.С. Александров, А.В. Орлов // Успехи современной радиоэлектроники. – 2003. – № 5. – С. 48-60.
2. Атражев, М.П., Ильин В.А., Марьин Н.П. Борьба с радиоэлектронными средствами. – М.: Воениздат, 1972. 272 с.
3. Афонин, И.Е., Макаренко С.И., Петров С.В. Описательная модель комплексов разведки, используемых для вскрытия системы воздушно-космической обороны и целеуказания при нанесении удара средствами воздушно-космического нападения // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 1. С. 190-214.
4. Ашурбейли, И.Р. Средства воздушно-космического нападения и воздушно-космической обороны. Состояние и развитие / Под общ. ред. И.Р. Ашурбейли. – М.: ПЛАНЕТА, 2017. – 336 с.
5. Богданов, А.В. Метод управления параметрами работы импульсно-доплеровской бортовой радиолокационной системы при обеспечении энергетической скрытности ее работы на излучение / А.В. Богданов, Д.В. Закомолдин, С.И. Акимов // Успехи современной радиоэлектроники. – 2021. – Т. 75, № 8. – С. 30-42.
6. Борисов, В.И. и др. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. – М.: Радио и связь, 2000. - 384 с.
7. Борисов, Е.Г. Высокоточное оружие и борьба с ним: учебное пособие / Е.Г. Борисов, В.И. Евдокимов. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 496 с. – ISBN 978-5-8114-1441-3. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/211244> (дата обращения: 18.04.2023).

8. Вакин С.А., Шустов Л.Н. Основы радиопротиводействия и радиотехнической разведки. М.: Советское радио, 1968. – 448 с.
9. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
10. Волков, А.М. Компьютерная расчетно-имитационная модель для исследования характеристик точности угломерного метода радиолокации / А.М. Волков, В.Н. Юдин // Авиация и космонавтика - 2018: Тезисы 17-ой Международной конференции, Москва, 19–23 ноября 2018 года. – Москва: Типография "Люксор", 2018. – С. 247.
11. Волков, А.М. Сравнение алгоритмов угломерного метода определения координат источников излучения, оптимизированных по критериям наименьших квадратов и наибольшего правдоподобия / А.М. Волков // Гагаринские чтения - 2019: Сборник тезисов докладов XLV Международной молодежной научной конференции, Москва, Барнаул, Ахтубинск, 16–19 апреля 2019 года / Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – Москва, Барнаул, Ахтубинск: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2019. – С. 510.
12. Волков, А.М. Достижимые уровни точности угломерной локации источников излучения на базе метода наименьших квадратов / А.М. Волков, В.Н. Юдин, А.К. Григорян // 18-я Международная конференция "Авиация и космонавтика - 2019": Тезисы, Москва, 18–22 ноября 2019 года / Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – Москва: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2019. – С. 118.
13. Волков, А.М. Достижимые уровни точности угломерной локации источников излучения на базе метода наибольшего правдоподобия / А.М. Волков // Гагаринские чтения - 2020: Сборник тезисов докладов, Москва, 27 декабря 2019 года – 17 апреля 2020 года. – Москва: Московский

- авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2020. – С. 618-619.
14. Волков, А.М. Ошибки пеленгования излучателей, обладающих фазоугловой зависимостью / А.М. Волков, В.Н. Юдин // 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика»: Тезисы 19-ой Международной конференции, Москва, 23–27 ноября 2020 года. – Москва: Издательство "Перо", 2020. – С. 337.
  15. Волков, А.М. Радиоподавление средств РТР путем шумовой маскировки рабочего излучения защищаемого РЛС / А.М. Волков, В.Н. Юдин // Авиация и космонавтика: Тезисы 20-ой Международной конференции, Москва, 22–26 ноября 2021 года. – Москва: Издательство "Перо", 2021. – С. 304-305.
  16. Ворона, С.Г. Обеспечение скрытности работы РЛС / С.Г. Ворона, С.Н. Булычев // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2021. – Т. 19, № 3. – С. 29-38.
  17. Выгодский, М.Я. Справочник по высшей математике / М.Я. Выгодский – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1973. – 872 с.
  18. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман – М.: Высшая школа, 1977. – 479 с.
  19. Головин, С.А. Высокоточное оружие и борьба с ним / С.А. Головин, Ю.Г. Сизов, А.Л. Скоков, Н.Н. Хунданов – М.: Издательство «Вооружение. Политика. Конверсия», 1996. – 231 с.
  20. Денисов, В.П. Фазовые радиопеленгаторы: монография / В.П. Денисов, Д.В. Дубинин. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2002. – 251 с.
  21. Дрогалин, В.В. Способы оценивания точности определения местоположения источников радиоизлучения пассивной угломерной двухпозиционной бортовой радиолокационной системой / В.В. Дрогалин,

- В.А. Ефимов, А.И. Канащенков и др. // Успехи современной радиоэлектроники. – 2003. – № 5. – С. 22-39.
22. Друзин, С.В. Методика формирования облика радиолокационных станций перспективной системы вооружения войсковой ПВО / Б.Н. Горевич, С.В. Друзин // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». – 2020. – № 2. – С. 6–31.
  23. Дубыкин, В.П. Оптимальные оценки координат источников радиоизлучений в угломерных системах / В.П. Дубыкин, В.А. Козьмин, А.М. Савельев, В.П. Скляднев // Антенны. – 2008. – № 7-8. – С. 154-156.
  24. Дулевич В.Е. Теоретические основы радиолокации. – М.: Сов. радио, 1964. – 732 с.
  25. Закиров В.Х., Закиров С.В., Цыбульник А.Н. Радиотехническая разведка: оценка разведывательно-информационных показателей средств РТР с учетом влияния атмосферы: монография / В. Х. Закиров, С. В. Закиров, А.Н. Цыбульник – Ярославль: ЯГПУ, 2011. – 118 с.
  26. Канащенков, А.И. Защита радиолокационных систем от помех. Состояние и тенденции развития / под ред. А.И. Канащенкова и В.И. Меркулова. - М.: Радиотехника, 2003. - 416 с.
  27. Каторин Ю.Ф., Разумовский А.В., Спивак А.И. Защита информации техническими средствами: Учебное пособие / Под редакцией Ю.Ф. Каторина – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 416 с.
  28. Кирсанов, Э.А. Нейросетевая реализация алгоритма оценивания координат источника радиоизлучения угломерной многопозиционной радиосистемой в трехмерном пространстве / Э.А. Кирсанов, С.А. Колесников // Радиотехника. – 2017. – № 9. – С. 45-49.
  29. Козлов, С.В. Методы и средства радиоэлектронной защиты: учеб. пособие / С. В. Козлов. – Минск: БГУИР, 2019. – 188 с.
  30. Кострыкин, П.А. Разработка методики расчета структурной скрытности радиолокационных станций с многочастотными квазишумовыми зондирующими сигналами / П.А. Кострыкин, К.Е. Хайбутов,

- М.Е. Хайбутов // Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники: III Всероссийская научно-практическая конференция / Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Том 2. – СПб: "Арт-Экспресс", 2016. – С. 283-288.
31. Кострыкин, П.А. Результаты экспериментальных исследований скрытности радиолокационных систем с многочастотными квазишумовыми сигналами / П.А. Кострыкин, К.Е. Хайбутов, М.Е. Хайбутов // РТИ Системы ВКО - 2017: Труды V Всероссийской научно-технической конференции, Москва, 25 мая 2017 года. – Москва: МГТУ имени Н.Э. Баумана (НИУ), 2018. – С. 669-680.
  32. Кравцов, Е.В. Метод обнаружения маломощных источников радиоизлучения // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2021. – №4 – С. 13-20.
  33. Куприянов А.И., Шустов Л.Н. Радиоэлектронная борьба. Основы теории. – М.: Вузовская книга, 2011. – 800 с.
  34. Леонов, А.И., Моноимпульсная радиолокация / А.И. Леонов, К.И. Фомичев. – М.: Советское радио, 1970. – 392 с.
  35. Леонов, С.А. Радиолокационные средства противовоздушной обороны / С.А. Леонов – М.: Воениздат, 1988. – 180 с.
  36. Лешко, Н.А. Радиотехническая разведка и скрытная радиолокация: монография / Н.А. Лешко, А.Н. Цыбульник. – Ярославль: ЯГПУ, 2006. – 152 с.
  37. Литвинов, Н.Н. Методологические особенности повышения скрытности радиолокационных станций / Н.Н. Литвинов, А.М. Лаврентьев // Вестник воздушно-космической обороны. – 2020. – № 2(26). – С. 27-32.
  38. Макаренко С.И., Иванов М.С. Сетевая война – принципы, технологии, примеры и перспективы. Монография. – СПб.: Научно-технологические технологии, 2018. – 898 с.

39. Макаренко С.И., Иванов М.С., Попов С.А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Монография. – СПб.: Свое издательство, 2013. – 166 с.
40. Макаренко, С.И. Информационное противоборство и радиоэлектронная борьба в сетевых войнах начала XXI века: монография. – СПб.: Научно-технологические технологии, 2017. – 546 с.
41. Макаренко, С.И. Использование космического пространства в военных целях: современное состояние и перспективы развития систем информационно-космического обеспечения и средств вооружения // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 4. С. 161-213.
42. Максимов, М.В. Защита от радиопомех / М.В. Максимов. – М.: Советское радио, 1976. – 496 с.
43. Марков, Г.Т. Антенны: учебник для студентов радиотехнических специальностей вузов. / Г.Т. Марков, Сазонов, Д.М. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975. – 528 с.
44. Мельников Ю.П. Воздушная радиотехническая разведка (методы оценки эффективности) – М.: Радиотехника, 2005. – 304 с.
45. Мельников, Ю.П. Воздушная активно-пассивная разведка надводных кораблей Методы оценки эффективности / Ю.П. Мельников. – М.: Радиотехника, 2017. – 498 с.
46. Меньшаков, Ю.К. Защита объектов и информации от технических средств разведки / Ю.К. Меньшаков. – М.: РГГУ, 2002. – 399 с.
47. Меньшаков Ю.К. Основы защиты от технических разведок: учебное пособие / Ю.К. Меньшаков; под ред. М.П. Сычева. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. – 478 с.
48. Мухаммедов Б.М. Анализ систем защиты РЛС обзора от противорадиолокационных ракет и облик нового канала дополнительной траекторной обработки // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. 2021. 10(91). [Электронный ресурс]

URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/12450> (Дата обращения: 23.04.2023).

49. Набилкин, В.С. Повышение энергетической и структурной скрытности радиолокационных сигналов за счет применения поляризационно-модулированных помех // Радиотехника. –2022. – Т. 86. – № 8. – С. 60-69.
50. Николаев С.В., Смирнов В.В. Радиоэлектронная борьба: теория, техника и организация / Под ред. В.В. Смирнова. - СПб.: Балтийский государственный технический университет “Военмех” имени Д.Ф. Устинова, 2005. – 332 с.
51. Николенко Н.Ф. Основы теории радиоэлектронной борьбы. – М., Воениздат, 1987.
52. Палий, А.И. Радиоэлектронная борьба / А.И. Палий. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Воениздат, 1989. – 350 с.
53. Перунов Ю.М., Куприянов А.И. Радиоэлектронная борьба: радиотехническая разведка. – М.: Вузовская книга, 2016. - 190 с.
54. Перунов Ю.М., Мацукевич В.В., Васильев А.А. Зарубежные радиоэлектронные средства / Под ред. Ю.М. Перунова. В 4-х книгах. Кн. 2: Системы радиоэлектронной борьбы. – М.: Радиотехника, 2010. – 352 с.
55. Перунов Ю.М., Фомичёв К.И., Юдин Л.М. Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием. – Изд. 2-е, перераб. и доп. / под ред. Ю.М. Перунова. – М.: "Радиотехника", 2008. – 415 с.
56. Перунов, Ю.М. Радиоэлектронная борьба в информационных каналах: монография / Ю.М. Перунов, А.И. Куприянов. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 452 с.
57. Потапов, А.Н. Способ защиты радиолокационной станции от противорадиолокационных ракет на основе дополнительных источников излучения / А.Н. Потапов, Ю.С. Свищо, В.С. Свищо, С.Н. Моисеев // Научный вестник МГТУ ГА. Серия Радиофизика и радиотехника – 2007. – № 112 – С. 132-135.

58. Разиньков, С.Н. Исследование энергетической скрытности радиолокационных станций с диапазонными антеннами от комплекса радиотехнического мониторинга / С.Н. Разиньков, О.Э. Разинькова, Ю.В. Сторожук // Антенны. – 2021. – № 3(271). – С. 20-30.
59. Сайбель, А.Г. Основы теории точности радиотехнических методов местоопределения / А.Г. Сайбель. – М.: Оборонгиз, 1958. – 56 с.
60. Сахнин А.А., Игнатенков В.Г. Защищенное информационное пространство. Комплексный технический контроль радиоэлектронных средств. – М.: Горячая линия-Телеком, 2016. 336 с.
61. Сивашенко, С.И. Скрытность радиосистем со сложными и хаотическими сигналами. // Системы навигации, управления и связи. – 2009. – № 3 (11). – с. 56–58.
62. Симонов, А. Н. Основы построения и функционирования угломерных систем координатометрии источников радиоизлучений: учебное пособие / А.Н. Симонов, Р.В. Волков, С.В. Дворников. – СПб.: ВАС, 2017. – 248 с.
63. Смирнов, Ю.А. Радиотехническая разведка. – М.: Воениздат, 2001. – 456 с.
64. Стренг, Г. Линейная алгебра и ее применения / Г. Стренг.: Пер. с англ. – М.: Мир, 1980.
65. Терентьев, А.В. Радиотехническая разведка: Теория и практика обработки радиолокационных сигналов / А.В. Терентьев, В.Ф. Коротков. – Санкт-Петербург: Медиапир, 2021. – 346 с.
66. Тузов, Г.И. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами – М.: Радио и связь, 1985. - 264 с.
67. Хорев, А.А. Техническая защита информации. Учеб, пособие для студентов вузов. В 3 т. Т. 1. Технические каналы утечки информации. – М.: НПЦ «Аналитика», 2008. – 436 с.
68. Цветнов В.В., Демин В.П., Куприянов А.И. Радиоэлектронная борьба: радиомаскировка и помехозащита. – Учебное пособие. – М.: МАИ, 1999. – 240 с.

69. Чапурский, В.В. Избранные задачи теории сверхширокополосных радиолокационных систем / В.В. Чапурский. – 3-е изд., испр. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 279 с.
70. Ширман, Я.Д. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория: Справочник / Я.Д. Ширман, Ю.И. Лосев, Н.Н. Минервин и др.; под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: ЗАО "МАКВИС", 1998. – 828 с.
71. Ширман, Я.Д. Теоретические основы радиолокации: учебное пособие для вузов / Я.Д. Ширман. – М.: Советское радио, 1970. – 560 с.
72. Юдин В.Н., Волков А.М. Уровни ошибок пассивной угломерной локации источников излучения при увеличении объема обрабатываемой информации // Электросвязь. – 2019. – № 12. – С. 56-61.
73. Юдин В.Н., Волков А.М. Достижимые уровни ошибок угломерной пассивной локации источников излучения на базе метода наибольшего правдоподобия // Электросвязь. – 2020. – № 4. – С. 25-30.
74. Юдин В.Н., Волков А.М. Ошибки разностно-фазового пеленгования излучателей, обладающих фазоугловой зависимостью // Электросвязь. – 2020. – № 12. – С. 50-53.
75. Юдин В.Н., Волков А.М. Радиоподавление средств радиотехнической разведки в интересах защиты радиолокационных средств // Электросвязь. – 2022. – № 2. – С. 52-60.
76. Юдин В.Н., Волков А.М. Маскировка излучения радиолокационного средства от радиотехнической разведки с использованием встроенного генератора шума // Электросвязь. – 2022. – № 8. – С. 39-44.
77. Юдин, В.Н. Активные маскирующие радиопомехи: учебное пособие к лабораторным работам / В.Н. Юдин. – М.: Изд-во МАИ, 2016. – 68 с.
78. Юдин, В.Н. Основные энергетические соотношения при анализе эффективности противорадиолокационной маскировки ЛА: учебное пособие / В.Н. Юдин. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 84 с.
79. Neri F. Introduction to Electronic Defense Systems. Artech House, 2018 – 603 p.

80. Pace P.E. Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar. Second Edition. – Artech House, 2009. – 857 p.
81. Schleher D.C. Electronic Warfare in the Information Age Artech House, 1999. – 605 p.
82. Torrieri D.J. Statistical Theory of Passive Location Systems. IEEE Transactions On Aerospace And Electronic Systems Vol. Aes-20, No. 2 March 1984 – p. 183-198.
83. Wiley R.G. ELINT: the interception and analysis of radar signals. Artech House, 2006. – 451 p.
84. Yudin V.N., Volkov A.M. Achievable Error Levels of the Goniometric Location of Radiation Sources Based on the Least Squares Method with an Increase of the Amount of Information Processed // 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. – IEEE Conference Record #48371. – 2020. – P. 1-5 – DOI: 10.1109/IEEECONF48371.2020.9078624.
85. URL: <http://www.vko.ru/node/332> (дата обращения: 15.10.2021).

## Приложение А. Копия акта внедрения

**УТВЕРЖДАЮ**

Первый заместитель генерального директора –  
генеральный конструктор  
ПАО «НПО «Алмаз»



*[Signature]* Н.Э. Ненартович

» 09 \_\_\_\_\_ 2023 г.

### АКТ

**о реализации результатов диссертационной работы Волкова А.М.,  
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук  
в ПАО «НПО «Алмаз» (г. Москва)**

Комиссия в составе  
председателя комиссии – начальника НТЦ-1, главного конструктора  
Лушенкова К.В.;

членов комиссии: советника начальника НТЦ-1, доктора технических наук  
Красного В.П.; заместителя начальника ОКБ-1 НТЦ-1, кандидата физико-  
математических наук Грицыка П.А.; начальника СКБ-240 НТЦ «НИИРП»,  
кандидата технических наук Чернецкого Н.П., начальника отдела 244 СКБ-240  
НТЦ «НИИРП», кандидата технических наук Шевченко В.Н.

установила, что результаты диссертационной работы Волкова Антона  
Михайловича, а именно разработанный методический аппарат анализа  
защищенности РЛС от средств РТР методами шумовой маскировки представляет  
практический интерес и был использован в рамках НИОКР, проводимых  
ПАО «НПО «Алмаз» (ОКР «Триумфатор-М», ОКР «Триумфатор-М1») в части  
противодействия радиотехнической разведке.

Председатель комиссии:



*[Signature]* К.В. Лушенков

Члены комиссии

*[Signature]* В.П. Красный

*[Signature]* П.А. Грицык

*[Signature]* Н.П. Чернецкий

*[Signature]* В.Н. Шевченко