

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ И МЕХАНИКИ НАНУ

На правах рукописи

ПАНТЕЕВ РОМАН ЛЕОНИДОВИЧ

УДК 004.94:004.89:004.62

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ
ИНТЕГРИРОВАННЫМИ МНОГОПОЗИЦИОННЫМИ КОМПЛЕКСАМИ
РАДИОМОНИТОРИНГА

Специальность 05.12.17 – Радиотехнические и телевизионные системы

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

Научный руководитель
Ткаченко Валерий Николаевич
доктор технических наук,
профессор

Киев, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
РАЗДЕЛ 1.....	13
ОБЗОР СОСТОЯНИЯ, ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ В СИСТЕМАХ РАДИОМОНИТОРИНГА.....	13
1.1 Развитие средств пассивного радиомониторинга. Принципы работы пассивных систем и определения координат ИРИ.....	13
1.2 Развитие средств активного радиомониторинга. Принципы работы активных систем и определения координат ИРИ.....	25
1.3 Перспективы развития систем интегрированного многопозиционного радиомониторинга.....	40
1.4 Уточнение целей и задач исследования.....	46
Выводы по первому разделу.....	48
РАЗДЕЛ 2.....	50
РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ИРИ В РДС И ИХ АНАЛИЗ.....	50
2.1 Разработка метода определения координат ИРИ в разностно- дальномерной системе на основе модифицированного метода Ньютона.....	50
2.1.1 Решение задачи разностно-дальномерной координатометрии модифицированным методом Ньютона.....	50
2.1.2 Исследование сходимости решения задачи разностно-дальномерной координатометрии методом Ньютона с однократно рассчитываемой матрицей Якоби.....	54
2.1.3 Анализ точности определения координат ИРИ разработанным методом с помощью компьютерного моделирования.....	56
2.2 Анализ нелинейной задачи разностно-дальномерной координатометрии при помощи функций параметрической чувствительности.....	58
2.2.1 Использование функций параметрической чувствительности для	

определения абсолютной погрешности определения координат ИРИ.....	58
2.2.2 Применение функций параметрической чувствительности для сокращения количества уравнений РДМ.....	63
2.3 Разработка метода определения координат ИРИ в РДС на основе критерия минимума взвешенной суммы квадратов ошибок и его анализ.....	65
2.3.1 Экстремальная постановка задачи определения координат ИРИ в РДС и ее решение.....	65
2.3.2 Анализ разработанного метода определения координат ИРИ в РДС при неравноточных измерениях разностей времен задержек прихода сигнала.....	67
Выводы по второму разделу.....	72
РАЗДЕЛ 3.....	74
РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ИРИ В ИНТЕГРИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСАХ РАДИОМОНИТОРИНГА И ИХ АНАЛИЗ.....	74
3.1 Разработка метода определения координат ИРИ в интегрированном комплексе «РДС- РВ» и его анализ.....	74
3.1.1 Разработка метода определения координат ИРИ в интегрированном комплексе «РДС-РВ» на основе критерия минимума суммы квадратов ошибок.....	74
3.1.2 Анализ точности определения координат ИРИ при совместной работе интегрированной системы «РДС–РВ».....	77
3.2 Разработка метода определения координат ИРИ в интегрированном комплексе «РДС - РЛС» и его анализ.....	84
3.2.1 Разработка метода определения координат ИРИ в интегрированном комплексе «РДС-РЛС» на основе критерия минимума суммы квадратов ошибок.....	84
3.2.2 Анализ точности определения координат ИРИ при совместной работе интегрированной системы «РДС–РЛС».....	88
Выводы по третьему разделу.....	94

РАЗДЕЛ 4.....	96
РЕАЛИЗАЦИЯ И ВНЕДРЕНИЕ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ИНТЕГРИРОВАННЫМИ МНОГОПОЗИЦИОННЫМИ КОМПЛЕКСАМИ РАДИОМОНИТОРИНГА....	96
4.1 Общие вопросы функционирования программного обеспечения КПРМ.....	96
4.2 Алгоритмическая реализация методов повышения точности определения координат ИРИ.....	107
4.3 Принятие решений при идентификации ИРИ по параметрам формируемых ими излучений.....	114
Выводы по четвертому разделу.....	128
ВЫВОДЫ.....	129
Список использованных источников.....	131
Приложение А.....	145
Документы, которые подтверждают результаты внедрения.....	145
Приложение Б.....	147
Примеры экранов рабочей программы.....	147

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ИРИ – источник радиоизлучения

КПРМ – комплекс пассивного радиомониторинга

ТМ – триангуляционный метод

РДМ – разностно-дальномерный метод

РТР – радиотехническая разведка

ПВО – противовоздушная оборона

РЭО – радиоэлектронная обстановка

АФС – антенно-фидерная система

РЛС – радиолокационная станция

ДН – диаграмма направленности

ПС – приемная станция

ИРИ – источник радиоизлучения

ЛА – летательный аппарат

РЗ – рабочая зона

ИП – информационный параметр

ИИС – информационно-измерительная система

ВКФ – взаимно-корреляционная функция

МНК - метод наименьших квадратов

ЦС – центральная станция

БС – боковая станция

ПО – программное обеспечение

МП – местоположение

РДС – разностно-дальномерная система

РДС-РВ – разностно-дальномерная система – радиовысотомер

РДС-РЛС – разностно-дальномерная система – активная

радиолокационная станция

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Появление противорадиолокационных ракет и высокоточного оружия значительно понизило живучесть активных радиолокационных станций и заставило разработчиков искать новые способы и средства повышения эффективности отдельных средств и группировок противовоздушной обороны. Кроме того, появление технологии скрытого полета "Стелс", гиперзвуковых летательных аппаратов и массированного применения помех привели к ужесточению требований к качеству целеуказания и, прежде всего, к темпу обзора, помехозащищенности, точностным характеристикам и качеству распознавания, выполнить которые, опираясь на активные РЛС традиционного построения, невозможно [1,2].

В свою очередь, пассивные средства радиомониторинга обладают значительным преимуществом по сравнению с активными средствами, состоящим, главным образом, в скрытности их работы. Однако, точностные характеристики определения координат пассивными системами радиолокации значительно уступают аналогичным характеристикам активных систем [2,3].

Ввиду достаточно высокой погрешности (10% и выше) измерения координат ИРИ комплексами пассивного радиомониторинга актуальной остается задача повышения точности их работы.

Кроме того, учитывая особенности работы систем как пассивного, так и активного радиомониторинга, важной является научно-практическая задача интеграции работы систем обоих типов как единого целого [5].

Серьезный вклад в исследование данной проблематики внесли работы следующих ученых: Я.Д. Ширман, Ю.К. Меньшаков, В.С. Черняк, И.Н. Прудюс, В.Е. Туров, Ю.П. Мельников, Р. Томович, М. Вукобратович, А.В. Гулин, А.Г. Сайбель, А.М. Рембровский.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Исследования по диссертационной работе выполнялись в соответствии с планом госбюджетных научно-исследовательских работ по следующим темам:

№ 0105U000266 «Алгебраические, комбинаторные, логические и эволюционные методы исследования дискретных и непрерывных систем и их использования в задачах идентификации и управления» и № 0114U002024 "Разработка современных аналитических и численных методов анализа и синтеза дискретных и непрерывных динамических систем".

Цель работы и задачи исследований. Целью диссертационного исследования является разработка способов повышения точности и скорости определения координат ИРИ системами пассивного радиомониторинга, интеграция пассивных и активных систем, а также создание системы обработки сигналов ИРИ с целью расчета его координат.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать основные задачи и особенности построения технических систем определения координат, проанализировать основные задачи и проблемы современных систем контроля РЭО.

2. Выполнить анализ существующих методов определения координат ИРИ в многопозиционных комплексах пассивной локации.

3. Разработать подход для определения условий использования вычислительного метода, ускоряющего процесс расчета координат ИРИ комплексами ПРМ;

4. Разработать, исследовать и реализовать метод, позволяющий учесть и скомпенсировать погрешность измерения задержки времени прихода сигнала на каждую из станций в отдельности, как способ повышения точности определения координат ИРИ;

5. Разработать новый способ интеграции активных и пассивных средств радиомониторинга в целях повышения точности определения координат ИРИ;

6. Разработать систему обработки сигналов для системы радиомониторинга на основе исследованных методов повышения скорости и точности расчета координат ИРИ;

7. Разработать и реализовать вычислительный метод, позволяющий ускорить процесс расчета координат ИРИ комплексами ПРМ;

Основная идея работы заключается в разработке новых способов обработки информации, получаемой от ИРИ, позволяющих повысить точность и скорость расчета координат ИРИ комплексами пассивного радиомониторинга. Новые способы позволяют достичь цели за счет модификации метода Ньютона применительно к решаемой задаче, использования методов параметрической чувствительности, а также экстремальной постановки РДМ с использованием весовых коэффициентов. Кроме того, разработан новый подход к интеграции пассивных и активных средств на основе использования квадратичных функционалов с использованием весовых коэффициентов.

Объектом исследований являются процессы определения координат ИРИ в интегрированных многопозиционных комплексах, работающих в системе реального времени.

Предметом исследований являются методы определения координат ИРИ при наличии избыточной информации о его местоположении.

Методы исследований. В работе использованы следующие методы: метод наименьших квадратов, методы решения экстремальных задач и систем нелинейных уравнений; математический аппарат функций параметрической чувствительности - для определения входных параметров метода определения координат цели; модифицированный метод Ньютона - для уменьшения времени расчета координат ИРИ; математический аппарат математической статистики и теории случайных процессов, метод статистических испытаний, имитационное моделирование - для исследования разработанных методов определения координат цели.

Научная новизна полученных результатов:

1. Впервые предложен метод определения координат ИРИ, который, в отличие от существующих, основан на использовании весовых коэффициентов при решении экстремальной постановки РДМ на основе минимизации

квадратичного функционала, что позволило увеличить точность определения координат ИРИ.

2. Разработан новый метод совместной обработки информации от КПРМ и высотомера, который, в отличие от существующих, основан на минимизации квадратичного функционала с использованием весовых коэффициентов, что позволило повысить точность определения координат ДРВ за счет получения дополнительной информации от высотомера.

3. Разработан новый метод совместной обработки информации от КПРМ и активной РЛС, который, в отличие от существующих, основан на минимизации квадратичного функционала с использованием весовых коэффициентов, что позволило повысить точность определения координат ДРВ за счет получения дополнительной информации от активной РЛС.

Практическое значение работы состоит в существенном повышении точности и скорости определения координат ИРИ как в условиях информационной избыточности, так и без неё и проявляется в следующем:

1. Разработанный метод совместной обработки информации от КПРМ и высотомера позволил уменьшить погрешность определения высоты z до 50 %. При этом погрешность определения двух других координат x и y и расстояния D до ДРВ также уменьшается на 50 % относительно величины погрешности определения координаты z .

2. Разработанный метод совместной обработки информации от КПРМ и активной РЛС позволил уменьшить погрешность определения координат x , y , z и расстояния D до ИРИ на 50 % - 60 %.

3. Усовершенствованный метод определения координат ИРИ на основе модификации метода Ньютона позволяет значительно уменьшить время расчета координат ИРИ при несущественном ухудшении точности расчета, что является важным при большом количестве ИРИ.

4. Разработанный с помощью теории параметрической чувствительности способ определения станции, вносит наибольшую погрешность, позволяет

исключить ее из расчетов в случае, если одна из координат ИРИ остается неизменной.

Разработаны практические рекомендации относительно внедрения и использования разработанных методов определения координат ИРИ в интегрированных многопозиционных КПРМ.

Разработанные в диссертации методы и алгоритмы внедрены в системы определения координат радиолокационных комплексов производства ПАО «Топаз».

Достоверность и обоснованность результатов, сформулированных выводов и рекомендаций подтверждается апробацией разработанных способов при помощи имитационного моделирования алгоритмов определения координат ИРИ для четырехпозиционных пассивных комплексов, систем «РДС - РВ», «РДС - РЛС», а также испытаний в составе пассивного комплекса дальнего радиотехнического мониторинга «Кольчуга-М».

Личный вклад соискателя. Все результаты научных и практических диссертационных исследований получены и разработаны автором самостоятельно. Из научных работ, опубликованных в соавторстве, в диссертационном исследовании опубликованы только те идеи, положения и результаты, которые являются самостоятельным исследованием соискателя.

Основными результатами диссертационного исследования, полученными автором являются:

- разработан модифицированный метод Ньютона применительно к решению системы гиперболических уравнений РДМ.
- исследована параметрическая чувствительность комплекса пассивного радиомониторинга, расположенного по схеме «звезда».
- детально исследована экстремальная постановка РДМ на основе минимизации квадратичного функционала с использованием весовых коэффициентов.
- проведены статистические испытания и анализ работы системы «РДС - РВ», «РДС - РЛС»

- предложен вариант реализации систем, обеспечивающих определение координат ИРИ, на основе комплекса пассивного радиомониторинга, а также «РДС - РВ», «РДС - РЛС».

- разработана математическая пространственно-временная модель объектов: комплекса пассивного радиомониторинга и ИРИ.

- разработаны пространственно-временные модели пассивного радиомониторинга.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- IV научно-практической конференции студентов и аспирантов «Погляд у майбутнє приладобудування». (2011 г., г. Киев);

- 4-ом Международном Радиоэлектронном Форуме “Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития“ (2011 г., г. Харьков);

- 16-м международном молодежном форуме «РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И МОЛОДЕЖЬ В XXI веке». (2012 г., г. Харьков);

- VI международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, студентов «Современная информационная Украина: информатика, экономика, философия» (2012 г., г. Донецк);

- XIX международной конференции по автоматическому управлению "АВТОМАТИКА/AUTOMATICS - 2012" (2012 г., г. Киев);

- 22-й международной крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (2012 г., г. Севастополь);

- Пятой международной научно-практической конференции «Информационные технологии и компьютерная инженерия» (2015 г., г. Ивано-Франковск);

- IEEE 3rd International Conference «Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments» (2015, Kyiv).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 печатных работ []. Основное содержание и результаты исследований изложены в 7 печатных работах в научных изданиях, рекомендованных МОН Украины, в том числе 2

печатные работы были опубликованы в зарубежных журналах, включенных в международные наукометрические базы. Одна статья была индексирована рейтингом SCOPUS. Семь печатных работ опубликованы в сборниках материалов конференций.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка литературы из 151 наименования. Работа изложена на 151 странице печатного текста, содержит 9 таблиц, 42 рисунков и 2 приложения.

РАЗДЕЛ 1

ОБЗОР СОСТОЯНИЯ, ПРОБЛЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ В СИСТЕМАХ РАДИОМОНИТОРИНГА

В разделе рассматриваются основные концепции создания и особенности использования современных пассивных и активных систем радиомониторинга, выполняется их классификация, исходя из принципов обработки информационного сигнала.

Анализируются основные методы определения координат в активных и пассивных системах радиомониторинга. Рассматриваются технические методы, цель которых устранить проблемы существующих типов систем. Делаются выводы о перспективах развития радиолокационных систем в целом.

Рассматриваются технические особенности многопозиционных пассивных комплексов, высотомера и трехкоординатной активной РЛС, особенности их использования.

На основе результатов анализа уточняются задачи исследования, формируются требования к разрабатываемым способам увеличения точности определения координат ИРИ интегрированными комплексами радиомониторинга.

1.1 Развитие средств пассивного радиомониторинга. Принципы работы пассивных систем и определения координат ИРИ

Появление противорадиолокационных ракет и высокоточного оружия значительно понизило живучесть активных радиолокационных станций и заставило разработчиков оружия искать новые способы и средства повышения эффективности отдельных средств и группировок противовоздушной обороны. Справедливость таких выводов неоднократно подтверждалась боевыми действиями в зонах локальных конфликтов. Кроме того, появление технологии

скрытого полета "Стелс", гиперзвуковых средств воздушного нападения и массированного применения помех привели к ужесточению требований к качеству целеуказания и, прежде всего, к темпу обзора, помехозащищенности, точностным характеристикам и качеству распознавания, выполнить которые, опираясь на активные РЛС традиционного построения, невозможно [1,2,3].

Первые в истории попытки боевого применения пассивных систем обнаружения сводились к использованию пеленгационных каналов РЛС с последующим объединением информации от различных РЛС на пункте обработки. Метод получил название триангуляции. Идея триангуляции довольно проста: направление на излучающий объект определяется из разных точек пространства, а затем по известным углам и расстояниям между РЛС определяется дальность до объекта (рис. 1.1) [4].

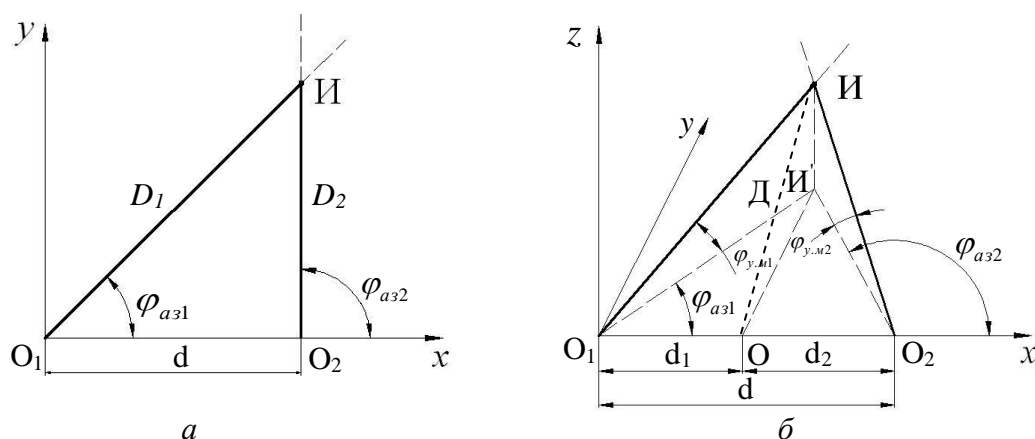


Рис. 1.1. Триангуляционный метод определения местоположения ИРИ на плоскости (а), в пространстве (б)

Если ИРИ располагается в горизонтальной или вертикальной плоскости, то для определения его месторасположения достаточно измерить два азимутальных угла: φ_{a31} и φ_{a32} или два угла места: $\varphi_{y,m1}$ и $\varphi_{y,m2}$. Местоположение источника излучений определяется точкой пересечения O_1I и O_2I (двух линий положения).

Для определения месторасположения источника в пространстве измеряются углы азимута φ_{a31} и φ_{a32} в двух разнесенных точках O_1 и O_2 и угол

места в одной из этих точек или, наоборот, углы места $\varphi_{\text{ум}1}$ и $\varphi_{\text{ум}2}$ в двух точках приема и угол азимута в одной из них (рис. 1.1, б) [4].

По измеренным пеленгационным углам путем несложных расчетов, используя теорему синусов, можно определить дальности из точек приема до ИРИ на плоскости:

$$D_1 = \frac{d \sin(180 - \varphi_{a32})}{\sin(\varphi_{a32} - \varphi_{a31})}, \quad (1.1)$$

$$D_2 = \frac{d \sin \varphi_{a31}}{\sin(\varphi_{a32} - \varphi_{a31})} \quad (1.2)$$

и в пространстве

$$D = \frac{d}{\cos \varphi_{\text{ум}1} (\cos \varphi_{a31} - \sin \varphi_{a31} \text{ctg} \varphi_{a32})} \quad (1.3)$$

Достоинство триангуляционного метода заключается в простоте его технической реализации, поэтому он широко применяется при ведении РР и РТР.

Существенным недостатком метода является наличие ложных обнаружений несуществующих источников при большом количестве излучающих объектов в зоне действия пеленгатора (рис. 1.2). Как видно из рисунка, наряду с определением координат трех истинных источников I_1, I_2, I_3 – обнаруживается и шесть ложных: $ЛИ_1, ЛИ_2, \dots, ЛИ_6$.

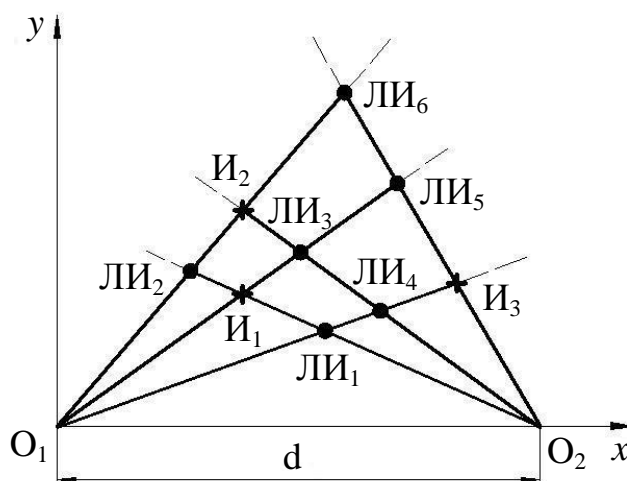


Рис. 1.2. Ложные обнаружения при использовании триангуляционного метода

Используются штатные РЛС, линии связи и пункт обработки. Однако, недостатки триангуляционного метода стали практически непреодолимым барьером на пути его боевого применения. Причины у этих недостатков две: низкая точность измерения координат и наличие большого числа ложных пересечений при пеленгации нескольких излучающих целей (рис. 1.2) [5].

Точность пеленгации определяется шириной луча РЛС, отнесенной к соотношению "сигнал-помеха", и для существующих РЛС достигает величины 0,25 - 0,5 град. Такая величина пеленгационной погрешности приводит к неприемлемым ошибкам вычисления дальности триангуляционным методом. Принципиально и то, что триангуляционный метод работает по непрерывному излучению. Кроме того, пеленгационный канал РЛС может обнаружить пеленг только в полосе частот станции - вне этой полосы излучение не фиксируется. А в результате переотражений от местных предметов, нижняя кромка обнаружения, в зависимости от длины базы (расстояния между пеленгаторами), достигает 200 - 4000 м [6,7].

Несмотря на то, что триангуляционные алгоритмы и были реализованы на командных пунктах радиотехнических войск, работали они по одиночным целям только при расстоянии между пеленгаторами порядка 120 - 200 км и практически не использовались на практике из-за принципиальной невозможности обеспечить точность и разрешение, достаточные для целеуказания активным средствам ПВО. Но интерес к пассивным локационным системам был достаточно высок и недостатки триангуляционного метода привели к поиску иных способов обнаружения и измерения координат излучающих объектов [8].

Наибольшее распространение получил разностно-дальномерный метод, основанный на измерении разности хода сигналов до приемных позиций. Этот метод позволяет работать как по импульсным, так и по непрерывным сигналам, в том числе по шумовым и шумоподобным [9]. Особенно эффективен он в случаях, когда для вычисления разности хода применяется базово-

корреляционная обработка (см. ниже), при которой вид принимаемых сигналов не имеет значения.

Принципиальное отличие разностно-дальномерного метода от триангуляции заключается в синхронном приеме сигналов от излучающего источника на разнесенных позициях [10]. Определение координат источника осуществляется по разности прихода сигналов на каждую из позиций, а сама разность прихода сигнала к одной позиции относительно другой определяется из положения максимума взаимно-корреляционной функции сигналов от этих позиций или разности прихода импульса до приемных пунктов (рис. 1.3).

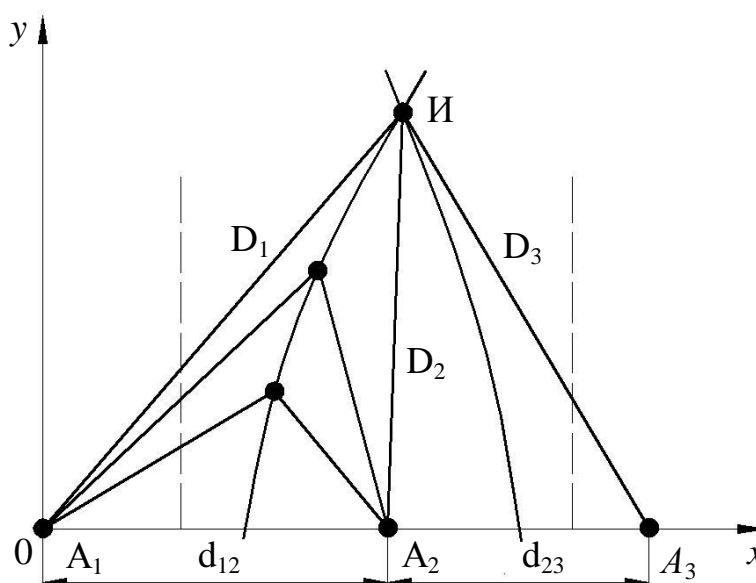


Рис. 1.3. Разностно-дальномерный способ определения местоположения ИРИ

Для нахождения координат ИРИ необходимо иметь три разнесенные в пространстве точки наблюдения (приема): A_1 , A_2 , A_3 , принадлежащие различным базам A_1A_2 и A_2A_3 . Фокусы гипербол совпадают с точками наблюдения. Разности расстояний $d_{12} = D_1 - D_2$ и $d_{23} = D_2 - D_1$ являются параметрами гипербол, по которым осуществляется их построение. Пространственное положение ИРИ определяется по трем разностям дальностей, измеряемым в трех-четырех приемных пунктах. МП источника – точка пересечения трех гиперболоидов вращения. Точность определения местоположения ИРИ данным методом достаточно высока, ошибки составляют

около десятков метров. Рассматриваемый метод применяется в пассивных импульсных (временных) и корреляционно-базовых системах определения МП ИРИ [11,12].

При использовании пассивных разностно-дальномерных систем также возможно обнаружение ложных несуществующих ИРИ в тех случаях, когда источник излучает периодические сигналы с малым периодом следования (с малой скважностью). На временном интервале, равном разности времени распространения сигнала от источника до приемника, укладывается несколько периодов излучаемых сигналов [13].

В результате система измеряет большое количество разностей дальностей и определяет соответственно большое количество гиперболических поверхностей. Многие из них являются ложными [14].

Устранить подобную неоднозначность можно путем разнесения источников по угловым координатам, то есть совместным применением разностно-дальномерного и триангуляционного методов [14].

Наряду с разностно-дальномерным в системах пассивной радиолокации также широко используется угломерно-разностно-дальномерный метод определения МП ИРИ, который предполагает измерение разности дальностей от ИРИ до двух разнесенных пунктов приема и измерение направления на источник излучения в одном из этих пунктов (рис. 1.4).

Для определения координат источника на плоскости достаточно измерить азимут β и разность дальностей $\Delta D = D_1 - D_2$ от источника до точек приема. МП источника определяется точкой пересечения гиперболы и прямой.

Для определения МП источника в пространстве необходимо дополнительно в одной из точек приема найти угол места ИРИ. МП источника находится как точка пересечения двух плоскостей и поверхности гиперboloида вращения [15].

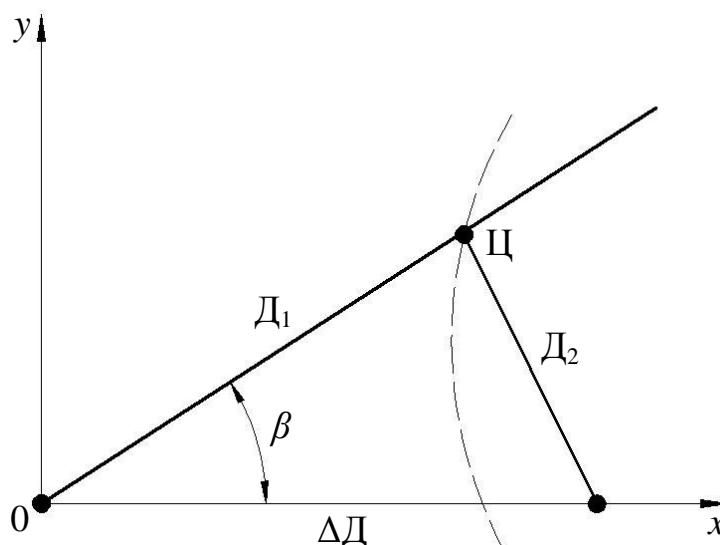


Рис. 1.4. Угломерно-разностно-дальномерный метод

Необходимо отметить, что названный выше базово-корреляционный метод позволяет получать точность измерения углов в несколько угловых минут - результат, недостижимый для триангуляционных систем и активных РЛС. Ошибка определения угловых координат при таком методе определяется отношением ошибки измерения разности хода сигналов к длине базы. Ошибка измерения разности хода определяется отношением интервала корреляции сигнала (величины, обратной полосе частот обрабатываемого сигнала) к пороговому отношению сигнал/помеха, возможности изменения которых в достаточной степени ограничены. В реальности ошибка измерения разности хода составляет порядка 5 - 10 м. Зато длина базы вполне может меняться и чем больше она будет, тем большие точности обеспечит метод. Так, например, длина базы в 30 км обеспечивает точность в 0,6 - 1,2 угловых минут.

Использование станции, работающей только по импульсным сигналам, в качестве средства целеуказания существенно сужает возможности радиолокационных систем. Например, постановщики активных помех остаются невидимыми. Не обнаруживаются также пользователи широкополосных многофункциональных систем связи типа JTIDS, "тихие" бортовые РЛС, использующие квазинепрерывный сигнал и тому подобные источники. Распознавание сигналов, реализованное для простых импульсов, усложняется

при попытках работать по более сложным сигналам. Кроме того, уже установилась тенденция использования в бортовых РЛС непрерывных и квазинепрерывных сигналов, что обещает сделать метод, базирующийся на измерении задержек прихода импульсов, полностью бесполезным для целей обороны. Потому в радиолокационных системах использование импульсного канала будет весьма недолгим, и перспектива развития за базово-корреляционными методом обнаружения, который не зависит от модуляции принимаемых сигналов и потенциально устойчив к помехам [16,17,18].

Практическая реализация методов пассивной локации связана с необходимостью отождествления, то есть установления соответствия между сигналами, принятыми в различных пунктах от одного и того же источника. Отождествление может не потребоваться, если имеется только один источник излучения и можно пренебречь приёмом по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны [19]. В этом случае при триангуляционном измерении источник должен находиться в точке пересечения соответствующих линий положения. Отождествление также не вызывает затруднения, если излучения источников можно различить по виду сигналов (по несущей частоте, характеру кодовых групп импульсов и т.д.). Отождествление облегчается, если число измеряемых параметров превышает число минимально необходимых для определения координат i -й цели, например, вместо трех параметров $\beta_1^{(i)}$, $\varepsilon_1^{(i)}$, $\beta_2^{(i)}$ измеряются четыре $\beta_1^{(i)}$, $\varepsilon_1^{(i)}$, $\beta_2^{(i)}$, $\varepsilon_2^{(i)}$.

Для отождествления стационарных процессов $y_1(t)$ и $y_2(t)$ на входах двух приёмников, обусловленных одним и тем же источником излучения, можно использовать возникающие при этом элементы сходства (корреляционные связи) процессов. Возможно использование корреляции одних лишь амплитуд (последетекторная корреляция), корреляции одних лишь фаз (корреляция после ограничения) и корреляции сигналов в целом с учетом и амплитуд и фаз (корреляция сигналов на промежуточной частоте и при достаточно большом динамическом диапазоне приёмников).

Последетекторная обработка сводится к вычислению корреляционной функции огибающих сигналов, додетекторная при большом динамическом диапазоне – к вычислению корреляционной функции самих сигналов. Практически обычно удается вычислить интеграл от произведения сдвинутых во времени напряжений сигналов, принимаемых в двух пунктах, в функции временного сдвига τ , вводимого, например, в одном из них,

$$z(\tau) = \int_0^T y_1(t-\tau)y_2(\tau)dt = z_1(\tau),$$

который, как и ранее, будем называть корреляционным. При бесконечно большом времени интегрирования $T \rightarrow \infty$ отношение корреляционного интеграла к величине T даёт корреляционную функцию случайных процессов $y_1(t)$ и $y_2(t)$. Качество приближения к корреляционной функции определяется произведением PT (произведение ширины P спектра частот колебаний на время интегрирования T) полосы обрабатываемых частот сигнала на время интегрирования. Корреляционная функция стационарных сигналов имеет при этом импульсный характер. Длительность корреляционного импульса обратно пропорциональна полосе обрабатываемых частот P . Положение максимума корреляционного импульса на оси τ соответствует разности временных запаздываний сигнала на пути между источником и приёмными пунктами.

Для нестационарных излучаемых сигналов (прерывистых, периодических и т.д.) при подобной обработке могут встретиться затруднения, связанные с пропусками или появлением ложных импульсов (ложных отсчетов).

Если на вход коррелятора поступают стационарные колебания от двух независимых источников $y_{11}(t)+y_{12}(t)$ и $y_{21}(t-\tau_1)+y_{22}(t-\tau_2)$, где первый индекс 1 или 2 показывает номер приёмника, а второй – номер источника, то напряжение на его выходе

$$z_T(\tau) = \int_0^T y_{11}(t-\tau)y_{21}(t-\tau_1)dt + \int_0^T y_{12}(t-\tau)y_{22}(t-\tau_2)dt + \\ + \int_0^T y_{11}(t-\tau)y_{22}(t-\tau_2)dt + \int_0^T y_{12}(t-\tau)y_{21}(t-\tau_1)dt,$$

причем в случае большого времени интегрирования T два последних интеграла малы по сравнению со значением первого при $\tau = \tau_1$ и со значением второго при $\tau = \tau_2$. Поэтому на выходе коррелятора на фоне небольших остатков будут наблюдаться два корреляционных импульса, которые разрешаются при

$$\tau_2 - \tau_1 \geq 1/P.$$

Если максимальная разность временных запаздываний равна $\tau_{max} = 2B/c$, то число разностно-временных (разностно-дальномерных, корреляционных) элементов разрешения составит $n = P\tau_{max}$. Произведение $P\tau_{max}$ в зависимости от метода измерения координат может изменяться в очень широких пределах.

Пусть число разрешаемых элементов по разности хода $P\tau_{max}$ больше, чем по угловой координате $\theta_{обз}/\Delta\theta_{0,5P}$, где $\theta_{обз}$ - ширина сектора обзора, а $\Delta\theta_{0,5P}$ - разрешающая способность по углу. Тогда координаты источника излучения могут быть определены более точно при использовании разностно-дальномерного или угломерно-разностно-дальномерного метода, чем при использовании триангуляционного. Системы базовой локации с разностно-дальномерным и угломерно-разностно-дальномерным методами измерения координат, использующие для определения разности расстояний корреляционный метод обработки, называют корреляционно-базовыми.

При этом угломерно-разностно-дальномерные корреляционно-базовые системы несколько проще решают задачу отождествления, чем разностно-дальномерные, так как отпадает необходимость отождествлять результаты корреляционных измерений на разных базах.

Особенностью устройств корреляционно-базовой локации является обзор по временному запаздыванию τ , который осуществляется с помощью корреляторов и может быть параллельным, последовательным и комбинированным.

Параллельный обзор по параметру τ в пассивной радиолокационной системе осуществляется многоканальным коррелятором, состоящим из линии задержки с отводами, умножителей и интеграторов. Время задержки одной

секции линии не должно заметно превышать разрешающую способность коррелятора $1/P$ по параметру τ , то есть число отводов должно соответствовать числу разрешаемых корреляционных элементов. Сигнал с выхода первого приёмного устройства подается на умножитель через линию задержки с отводами, с выхода второго – через линию связи одновременно на все умножители. Результаты перемножений интегрируются. Максимальное корреляционное напряжение сигнала будет на выходе интегратора после той секции линии, время задержки в которой соответствует измеряемому параметру τ^* .

Последовательный обзор по временному запаздыванию τ осуществляется одноканальным коррелятором, в котором задержка одного из сигналов изменяется непрерывно. При плавном изменении задержки одного из сигналов на выходе коррелятора имеют место корреляционные импульсы напряжения, пиковые значения которых на оси τ соответствуют оценкам τ^* для различных источников излучения и могут быть считаны с экрана индикатора с помощью масштабных меток.

Если обзор по времени запаздывания совершается одновременно с последовательным обзором по угловым координатам (например, по азимуту), то время интегрирования T сокращается. Пусть антенна одного приёмного пункта слабо направлена, другого – остро направлена. Тогда длительность принимаемого сигнала $t_{np} = \frac{\theta_{0,5P} t_{обз}}{\theta_{обз}}$ определяется шириной диаграммы направленности остро направленной антенны $\theta_{0,5P}$, просматриваемым сектором $\theta_{обз}$ и периодом обзора $t_{обз}$. При параллельном обзоре по параметру τ возможное время интегрирования будет $T = t_{np}$. При последовательном обзоре оно в n раз меньше, чем при параллельном, где n - число разрешаемых корреляционных элементов.

Возможно комбинированное использование параллельного и последовательного обзора (или взаимное согласование обзора по параметру τ и по угловой координате θ) в целях увеличения времени интегрирования.

Многоканальный приёмник, являясь наиболее широко распространённым типом приёмного устройства в системах пассивной радиолокации, основан на разбивке диапазона разведываемых частот на ряд поддиапазонов. Другими словами, в нём используется набор одноканальных приёмников, амплитудно-частотные характеристики которых, примыкая друг к другу, перекрывают заданный диапазон частот. Отдельный приёмный канал включает полосовой фильтр Φ_i с крутыми срезами, амплитудный детектор, видеоусилитель и индикаторное устройство, с помощью которого фиксируется попадание сигнала в данный канал. Одна антенная может обслуживать несколько каналов (рис. 1.5) [20].

Для повышения чувствительности приёмного тракта после антенны может быть включен малошумящий усилитель (МШУ). В состав многоканального приёмника входит также регистрирующее устройство, к которому подводятся выходные сигналы от всех каналов. С помощью регистрирующего устройства осуществляется обнаружение сигналов на выходе каждого канала и регистрация частот обнаруживаемых сигналов.

Многоканальные приёмники могут быть также построены по схеме супергетеродина. Такой приёмник состоит из общей ВЧ части, гетеродина и смесителя, трансформирующих входные сигналы в область промежуточных частот. Далее диапазон промежуточных частот разделяется системой фильтров на ряд поддиапазонов, затем для каждого поддиапазона проводятся стандартные операции усиления на промежуточной частоте, детектирования и усиления низкочастотных сигналов.

Многоканальные приёмники применяют, как правило, в станциях общей обзорной разведки для грубого определения несущей частоты и типа разведываемого ИРИ. Число каналов в них может достигать несколько десятков, а иногда и сотен. Основное достоинство многоканальных приёмников

– их простота и надёжность. Применение микроэлектронной элементной базы позволяет создавать многоканальные структуры с очень большим количеством каналов при малых габаритах, весе и потреблении энергии.

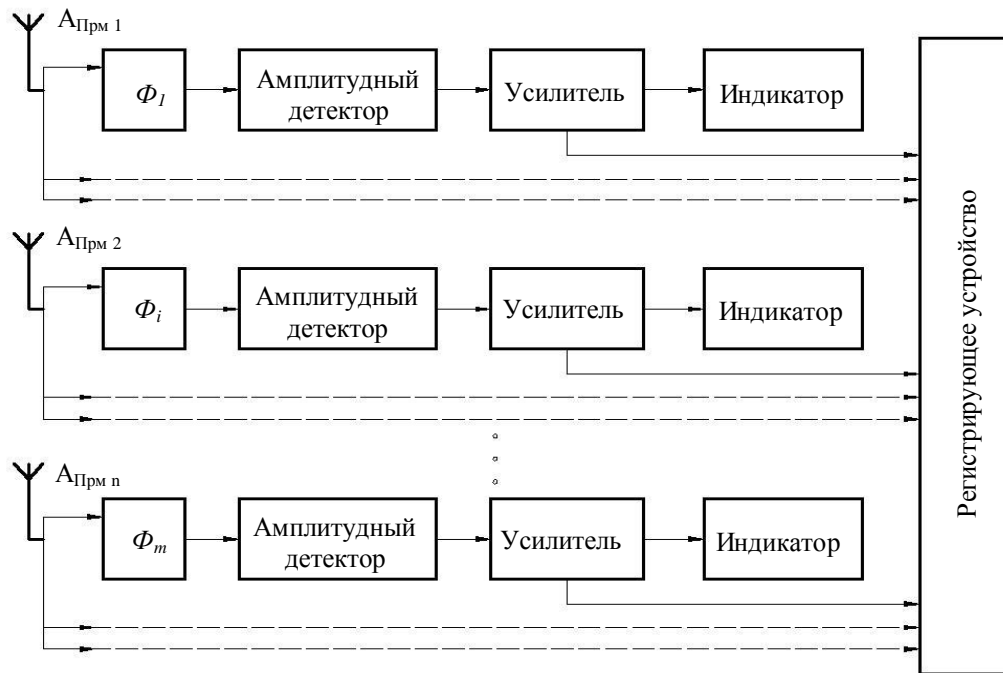


Рис. 1.5. Структурная схема многоканального приёмника прямого усиления

1.2 Развитие средств активного радиомониторинга. Принципы работы активных систем и определения координат ИРИ

Одной из задач, которые решают при ведении активной РР и РТР является определение МП ИРИ на плоскости или в пространстве [21].

Местоположение источников ИРИ на плоскости определяется с помощью линий положения, а в пространстве - поверхностей положения

Линиями положения могут быть:

- линия пеленга или прямая, соединяющая средство разведки и ИРИ;
- окружность с радиусом, равным расстоянию от средства разведки до ИРИ;
- гипербола, параметрами которой служат разности расстояний от двух точек наблюдения, являющихся фокусами гиперболы, до ИРИ.

Местоположение ИРИ на плоскости определяется по пересечению нанесенных на карту минимум двух линий положения.

Поверхностями положения могут быть плоскости, сферы, гиперболоиды вращения [22, 23].

Местоположение ИРИ в пространстве определяется по пересечению поверхностей положения. Для этого необходимо воспользоваться как минимум тремя поверхностями положения.

На практике для определения координат ИРИ на карте достаточно знать только линии положения. Их пересечение покажет МП объекта.

В основу определения геометрических величин ИРИ радиотехническими методами положены закономерности распространения электромагнитных волн (ЭМВ). В свободном пространстве ЭМВ распространяются прямолинейно и с конечной постоянной скоростью [24].

Так как траектория распространения ЭМВ прямолинейна, то с помощью средств РР и РТР можно определить направление на работающую РЛС. т. е. линию пеленга.

Постоянство скорости распространения ЭМВ позволяет измерять разности дальностей от МП ИРИ до фиксированных точек наблюдения. Измерение разности дальностей сводится к измерению временных интервалов - разности времен распространения ЭМВ от ИРИ до точек расположения средств разведки [25].

Измерительные устройства пеленгационного типа используют поисковые и беспойсковые способы определения направления на ИРИ, а затем и его МП.

Поисковые способы пеленгации позволяют определить направление на источник излучения путем последовательного обзора пространства с помощью направленной антенны. Определение пеленга требует в этом случае некоторого времени [26,27].

В зависимости от радиосигнала, используемого для определения пеленга, методы радиопеленгации подразделяются на амплитудные и фазовые.

Амплитудная пеленгация может осуществляться: по максимуму/минимуму диаграммы направленности антенны (ДНА) по использованию равносигнального направления.

Пеленгация по максимуму ДНА.

Структурная схема пеленгационного устройства показана на рис. 1.6. Схема пеленгатора состоит из направленной антенны, усилителя частоты (УРЧ),

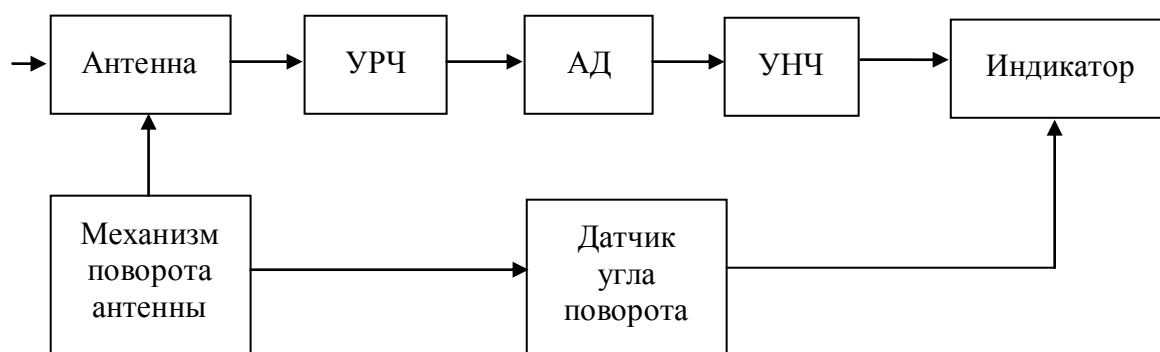


Рис. 1.6. Структурная схема амплитудного пеленгатора

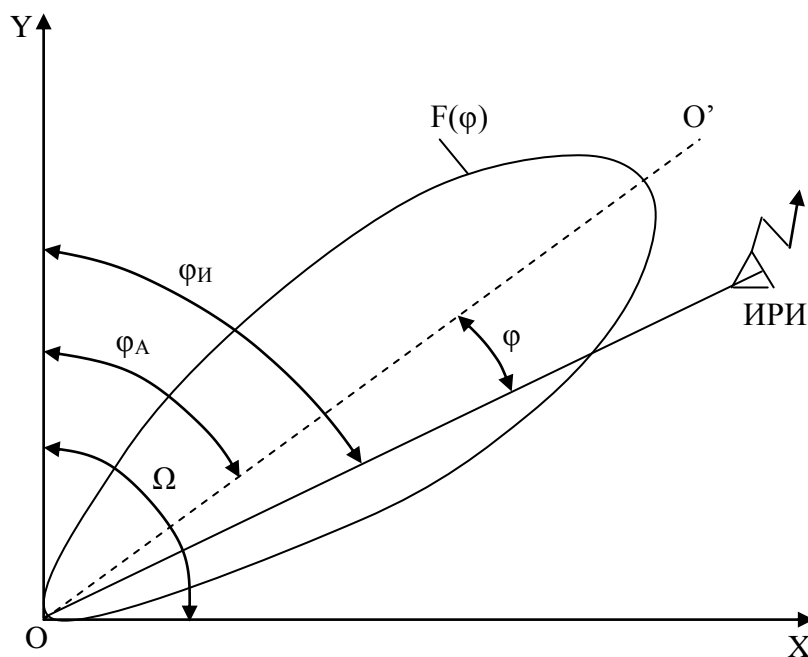


Рис. 1.7. Принцип метода максимума

антенны, амплитудного детектора (АД), усилителя низкой радиочастоты (УНЧ), индикатора, механизма поворота антенны с датчиком угла поворота. При пеленгации по максимуму ДНА антенна станции разведки вращается с некоторой угловой скоростью (рис. 1.7) [28].

Направление на ИРИ будет соответствовать максимальному уровню принимаемого сигнала. В этот момент производится отсчет пеленгационного угла φ от направления, связанного с началом отсчета (меридиан, направление на север, курсовой угол летательного аппарата) [29].

Основными достоинствами метода максимума являются: простота определения пеленгационного угла, а также максимальное отношение сигнал/шум в момент точного пеленга [30,31].

Недостатком метода является относительно низкая точность измерения угловых координат, обусловленная небольшими изменениями в силе принимаемого сигнала при малых угловых перемещениях ДНА относительно истинного направления на источник излучения [32]. На практике точность измерения угловых координат составляет примерно 20-25 % от ширины ДНА по уровню половинной мощности.

Как правило, пеленгование по максимуму применяется в аппаратуре разведки сантиметрового диапазона, так как узкая направленность антенны этого диапазона позволяет существенно увеличить точность измерения угловых координат [33]. Использовать метод максимума в метровом диапазоне затруднительно из-за широкой направленности антенны, следовательно, ошибок пеленгования.

При пеленгации по минимуму ДНА в метровом диапазоне длин волн используется антенна с ДН в виде «восьмерки» рис. 1.8, а.

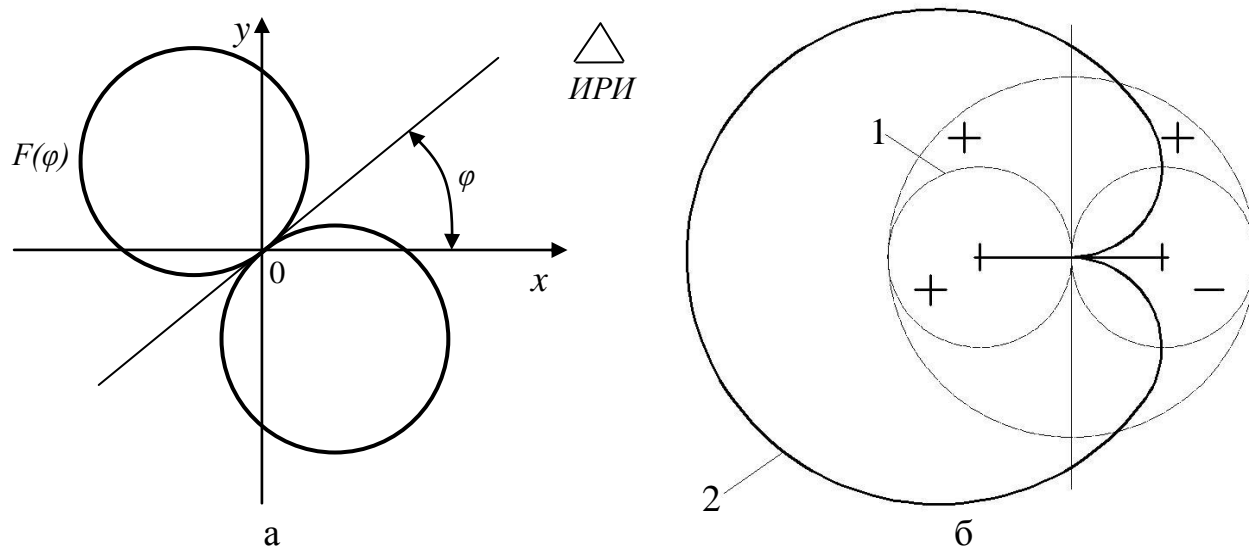


Рис. 1.8. Сущность метода пеленгации по минимуму в метровом диапазоне (а), устранение неоднозначности отсчета (б)

Пеленгование осуществляется по минимуму слышимости сигнала или по пропаданию сигнала на электронно-лучевом индикаторе. Диаграмма направленности в виде «восьмерки» имеет два минимума, отличающихся один от другого на 180° . Поэтому необходимо принимать дополнительные меры для устранения неоднозначности отсчета. Для этого следует иметь ДНА с одним минимумом приема. ДН такого типа может быть получена, если использовать совместно направленную и ненаправленную антенны, сигналы от которых должны быть равны по амплитуде (рис. 1.8, б) [34]. Фаза наведенного сигнала в ненаправленной антенне не зависит от направления на излучатель. Фаза наведенного сигнала а направленной антенне («восьмерочная» ДНА) меняется на 180° при переходе через направление нулевого приема [35]. Поэтому в направлении приема сигналов ИРИ, указанном на рис. 1.7, б, ЭДС сигналов в двух антеннах оказываются в противофазе и будут вычитаться. В противоположном направлении ЭДС сигналов оказываются в фазе и будут складываться. В результате суммарная ДН будет иметь форму кардиоиды с одним минимумом, смещенным в пространстве на 90° по отношению к минимуму «восьмерочной» диаграммы. Необходимо отметить, что минимум кардиоиды значительно тупее минимума «восьмерки», поэтому кардиоидная

характеристика используется для устранения неоднозначности после определения пеленга с помощью ДН «восьмерочного» типа [36].

При определении пеленгационного угла методом минимума в сантиметровом диапазоне может использоваться система из двух направленных антенн, смещенных одна относительно другой на соответствующий постоянный угол. В результате образуется суммарная ДН антенной системы с резко выраженным направлением нулевого приема (рис. 1.9).

При пеленгации ИРИ антенная система поворачивается до тех пор, пока линия нулевого приема (OO') не совпадает с направлением на объект ($OИ$). В принципиальном отношении точность метода минимума должна быть значительно выше точности метода максимума, так как небольшому отклонению направления на объект от линии нулевого приема соответствует резкое изменение амплитуды принимаемого сигнала [37].

При использовании метода равносигнального направления используется антенная система, состоящая из двух направленных антенн смещенных одна относительно другой на некоторый постоянный угол так, что их ДН перекрываются и

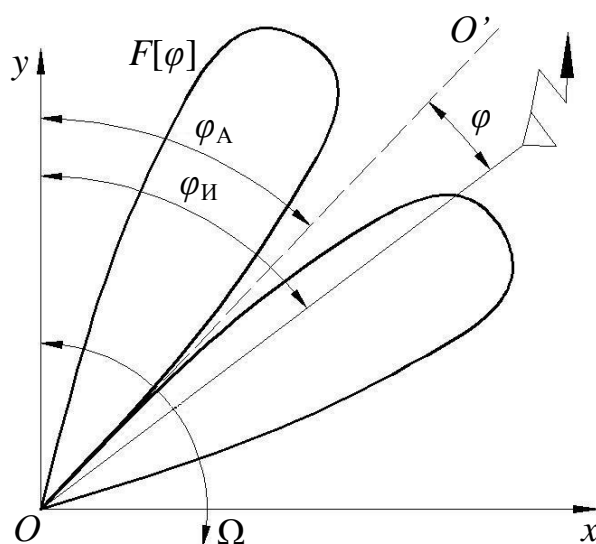


Рис. 1.9. Принцип метода минимума при пеленгации в сантиметровом диапазоне

равносигнального направления сопровождаются резким изменением интенсивности принимаемого сигнала; во-вторых, при равносигнальном методе сравниваются амплитуды двух одновременно наблюдаемых сигналов, в результате процесс установки точного пеленга облегчается [38].

Можно считать, что равносигнальный метод по точности на порядок превосходит метод максимума. Кроме того, равносигнальный метод позволяет определить направление отклонения объекта разведки от линии равных сигналов, что облегчает задачу его сопровождения. Недостатками равносигнального метода являются:

- меньшая дальность действия, так как в момент пеленгации максимум ДНА отклоняется от направления на объект;
- более сложное устройство.

При использовании метода сравнения фаз (фазовый метод пеленгации) антенны с идентичными ДН разносятся на некоторое расстояние d - базу пеленгатора

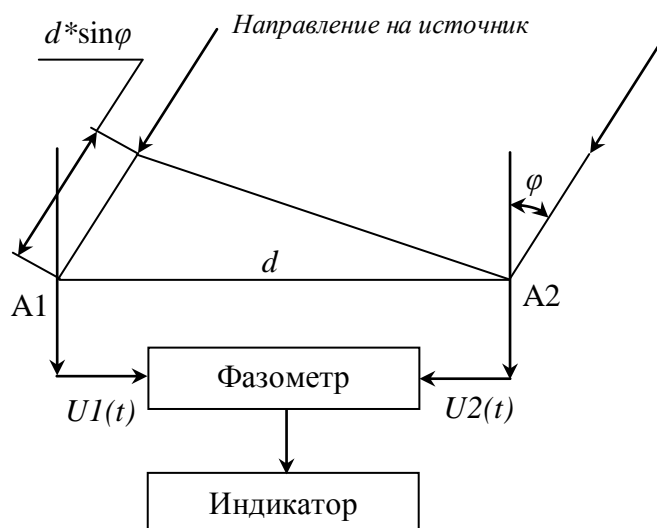


Рис. 1.11. Упрощенная структурная схема фазового пеленгатора (рис. 1.11). В результате ЭМВ, принимаемые антеннами A1 и A2 с направления, определяемого углом φ , проходят различные расстояния, разность между которыми составляет

$$\Delta d = d \sin \varphi$$

При этом разность фаз высокочастотных колебаний принимаемого сигнала в антеннах А1 и А2 будет

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta d}{\lambda} = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \varphi \quad (1.4)$$

$$\sin \varphi = \frac{\Delta\varphi \lambda}{2\pi d}, \quad (1.5)$$

Откуда

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2\pi d} \Delta\varphi\right), \quad (1.6)$$

где λ - длина волны принимаемого сигнала.

Из формулы для φ следует, что для измерения угла прихода ЭМВ необходимо определить разность фаз ЭДС $\Delta\varphi$ в антеннах А₁ и А₂.

Существенным недостатком однобазовых фазовых пеленгаторов является неоднозначность отсчета пеленга, обусловленная функцией $\sin \varphi$. Этот недостаток можно устранить при использовании антенной системы с несколькими разными по значению базами [39,40].

Особенность поисковых способов - вероятностный характер обнаружения излучающего объекта, а следовательно, и определение его пеленга.

Допустим, что разведываемым ИРИ является РЛС, работающая в режиме кругового обзора. Антенна РЛС имеет ДН с шириной Θ_c и вращается с угловой скоростью Ω_c (рис. 1.12) [41].

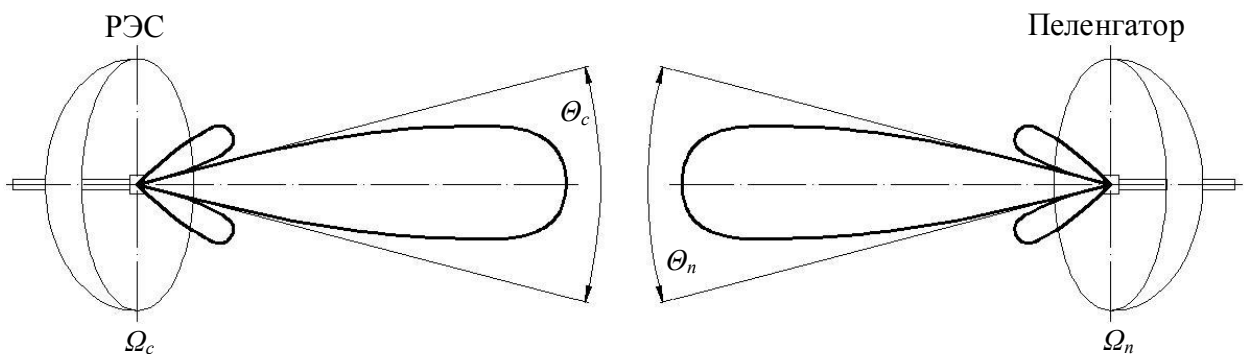


Рис. 1.12. Поисковый способ определения пеленга

При круговом вращении антенны РЛС в точке приема П получим серии импульсов, следующих с частотой F_c (период T_c),

$$F_c = \frac{\Omega_c}{2\pi} \quad (1.7)$$

Длительность серии импульсов τ_c - это время облучения РЛС данного направления. Она определяется шириной ДНА и угловой скоростью вращения антенны

$$\tau_c = \frac{\Theta_c}{\Omega_c} = \frac{\Theta_c T_c}{2\pi} \quad (1.8)$$

Время, в течение которого антенна пеленгатора может принимать сигнал РЛС, определяется шириной ДНА и угловой скоростью вращения:

$$\tau_n = \frac{\Theta_n}{\Omega_n} = \frac{\Theta_n T_n}{2\pi} \quad (1.9)$$

Прием сигналов РЛС будет происходить в моменты совпадения ДНА РЛС и пеленгатора. Таким образом, вероятность обнаружения (пеленгации) зависит от Θ_c и Θ_n , а также соотношения скоростей вращения антенн пеленгатора и РЛС (Ω_c и Ω_n).

В зависимости от соотношения между Θ_c и Θ_n различают медленный и быстрый поиск сигнала по направлению.

1. Медленный поиск.

При медленном поиске скорость вращения антенны пеленгатора выбирается такой, чтобы за время τ_n ее прохода угла, равного ширине основного лепестка ДН антенна РЛС сделала хотя бы один оборот, то есть $\tau_n > T_c$ - условие медленного поиска.

При быстром поиске скорость вращения антенны пеленгатора выбирается такой, чтобы за время τ_c прохода антенной РЛС угла, равного ширине основного лепестка ДН антенны (Θ_c), она сделала хотя бы один оборот, то есть $\tau_c \geq T_n$ - условие быстрого поиска.

Определим формулы расчета вероятности обнаружения (пеленгации) для медленного и быстрого поиска по направлению. Из теории известно, что вероятность обнаружения при n оборотах антенны РЛС (антенны пеленгатора) определяется формулой

$$P_n = 1 - e^{-nP_1}, \quad (1.10)$$

где P_1 - вероятность обнаружения за один оборот антенны.

1. Медленный поиск $\tau_n \geq T_c$, $\Omega_n < \Omega_c$.

В этом случае вероятность перехвата сигнала за один оборот антенны РЛС

$$P_1 = \frac{\tau_c}{T_n}, \quad P_1 = \frac{\Theta_c T_c}{2\pi T_n} \quad (1.11)$$

и, следовательно,

$$P_{n_c} = 1 - e^{-\frac{n_c \Theta_c T_c}{2\pi T_n}} \quad (1.12)$$

где $n_c = \frac{t_p}{T_c}$; n_c - число оборотов антенны РЛС за время разведки t_p .

Окончательно

$$P_{n_c} = 1 - e^{-\frac{\Theta_c t_p}{2\pi T_n}}$$

2. Быстрый поиск

$$\tau_c \geq T_n, \quad \Omega_n > \Omega_c.$$

Для этого случая вероятность перехвата сигнала за один оборот антенны пеленгатора определится соотношением

$$P_1 = \frac{\tau_n}{T_c} \quad \text{или} \quad P_1 = \frac{\Theta_n T_n}{2\pi T_c} \quad (1.13)$$

и, следовательно,

$$P = 1 - e^{-\frac{n_n \Theta_n T_n}{2\pi T_c}} \quad (1.14)$$

где $n_n = \frac{t_p}{T_n}$, n_n - число оборотов антенны пеленгатора за время ведения разведки t_p

Окончательно

$$P_{n_{II}} = 1 - e^{-\frac{\Theta_n t_p}{2\pi T_c}} \quad (1.15)$$

Формулы для P_n при медленном и быстром поисках показывают, что вероятность обнаружения (пеленгация) стремится к 1 при увеличении общего времени ведения разведки t_p , ширины ДНА пеленгатора Θ_n и скорости вращения Ω_n (уменьшения T_n). Поэтому необходимо увеличивать t_p . Однако в ряде случаев по условиям ведения разведки рост t_p может быть ограничен. Поисковая антенна должна иметь по возможности более широкую ДН. Но увеличение Θ_n приводит к уменьшению коэффициента усиления антенны, что снижает возможную дальность ведения разведки, пространственную разрешающую способность и точность пеленгования.

Увеличение скорости вращения антенны пеленгатора Ω_n ограничивается механической прочностью конструкции вращающейся антенны. Кроме того, скорость Ω_n должна выбираться таким образом, чтобы за время τ_n принять хотя бы один импульс РЛС, то есть возникает условие $\tau_n > T_u$ (T_u - период следования импульсов РЛС).

Следовательно, с точки зрения оптимизации величины P_n в каждом конкретном случае выбор указанных выше параметров поиска определяется условиями ведения разведки и поставленными задачами [41].

Реализация беспойсковых методов пеленгации предполагает обзор пространства без сканирования пространства антенной системой. В самом простом случае беспойсковое определение направления на ИРИ может быть реализовано на основе многоканальной пространственно-избирательной системы, состоящей из антенн (A_1, A_2, \dots, A_n), каждая из которых подключена к соответствующему приемному устройству ($Прм_1, Прм_2, \dots, Прм_n$) с индикаторами ($И_1, И_2, \dots, И_n$) [42].

Диаграммы направленности антенн примыкают одна к другой и в совокупности перекрывают весь заданный сектор разведки α_p (рис. 1.13):

$$\alpha_p = \alpha_{max} - \alpha_{min} = \sum_{i=1}^n \alpha_i ,$$

где α_i - ширина диаграммы направленности i -ой антенны.

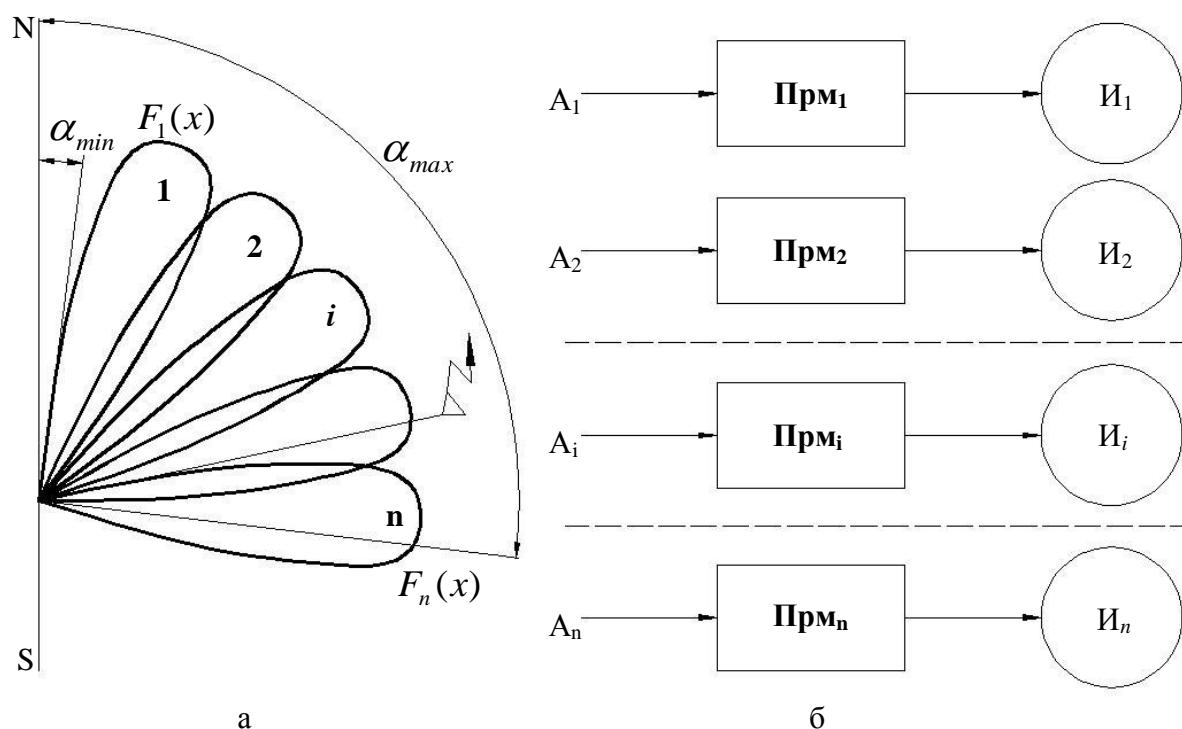


Рис. 1.13. Беспойсковый метод определения направления: а – суммарная диаграмма направленности; б – многоканальное пространственно-избирательное устройство

Направление на ИРИ определяется по номеру канала, в котором появляется сигнал. Максимальная ошибка измерения пеленга в этом случае

$$\Delta\alpha_{max} = \frac{\alpha_i}{2}$$

Высокая точность измерения пеленга может быть обеспечена с помощью большого количества антенн с узкими диаграммами направленности. Обычно задается допустимая ошибка измерения направления, тогда ширина диаграммы направленности каждой антенны

$$\alpha_i \leq 2\Delta\alpha_{max}$$

Количество необходимых антенн для перекрытия заданного сектора разведки будет

$$N = \frac{\alpha_p}{\alpha_i} = \frac{\alpha_p}{2\Delta\alpha_{max}}$$

Основные достоинства беспойскового метода:

- возможность определения направлений на несколько ИРИ одновременно (при их разнесении по углу не менее, чем на α_i);
- вероятность обнаружения и пеленгации равна единице;
- практически мгновенное определение направления.

При беспойсковых методах определения направления применяют функциональные пеленгационные устройства, основанные на использовании зависимости амплитуды или фазы сигнала на выходе пеленгатора от угла прихода радиоволн [43,44].

Принцип действия функционального фазового пеленгатора не отличается от описанного выше. При функциональной амплитудной пеленгации (метод сравнения амплитуд) применяют, как минимум, две антенны, имеющие одинаковые диаграммы направленности, которые размещают так, чтобы направления максимумов приемов были смещены на некоторый угол. При этом диаграммы направленности этих антенн перекрывают некоторый сектор φ_p , в котором ведется разведка (рис. 1.14).

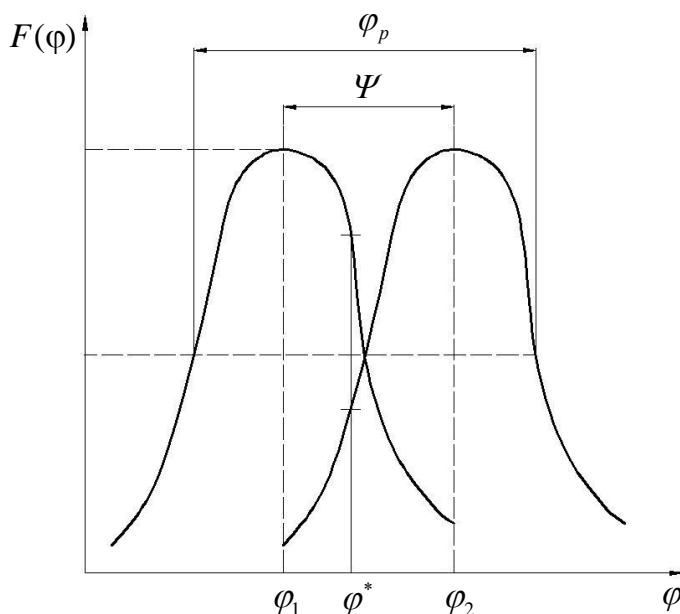


Рисунок 1.14. Функциональная амплитудная пеленгация

Нормированную диаграмму направленности первой антенны можно представить в виде

$$F_1(\varphi) = e^{-\frac{(\varphi - \varphi_1)^2}{B^2}}, \quad (1.16)$$

где B – некоторая постоянная, связанная с формой диаграммы направленности; φ_1 – направление максимального приема, отсчитываемое от выбранного начального направления.

Для диаграммы направленности такой антенны можно записать

$$F_2(\varphi) = e^{-\frac{(\varphi - \varphi_2)^2}{B^2}}, \quad (1.17)$$

здесь φ_2 – направление максимального приема для второй антенны, при этом $\varphi_2 = \varphi_1 + \Psi$.

Подставляя значение φ_2 в формулу (4.14), получаем

$$F_2(\varphi) = e^{-\frac{\Psi^2}{B^2}} e^{-\frac{(\varphi - \varphi_1)^2}{B^2}} e^{\frac{2\Psi(\varphi - \varphi_1)}{B^2}}$$

или

$$F_2(\varphi) = F_1(\varphi) e^{-\frac{\Psi^2}{B^2}} e^{\frac{2\Psi(\varphi - \varphi_1)}{B^2}} \quad (1.18)$$

Амплитуды сигналов, принятых с направления на разведываемый ИРИ (φ^*), пропорциональный ординатам соответствующих диаграмм направленностей. Поэтому можно записать

$$\frac{U_2}{U_1} = e^{-\frac{\Psi^2}{B^2}} \frac{F_1(\varphi^*) e^{\frac{\Psi^2(\varphi^* - \varphi_1)}{B^2}}}{F_1(\varphi^*)} = e^{-\frac{\Psi^2}{B^2}} e^{\frac{\Psi^2(\varphi^* - \varphi_1)}{B^2}}. \quad (1.19)$$

Логарифмируя (1.19) и выполняя преобразования, получаем

$$\varphi^* = \frac{B^2}{2\Psi} \ln\left(\frac{U_2}{U_1}\right) + \frac{\Psi}{2} + \varphi_1. \quad (1.20)$$

При неизвестных B^2 , Ψ , φ_1 величина φ^* является однозначной функцией

$$\ln\left(\frac{U_2}{U_1}\right):$$

$$\varphi^* = f\left(\ln \frac{U_2}{U_1}\right) \quad (1.21)$$

Функциональные пеленгаторы имеют высокую точность определения направления. Они успешно применяются в диапазонах метровых и сантиметровых волн в наземных станциях РР и РТР. Использование их в метровом диапазоне на самолетах наталкивается на серьезные трудности, связанные с габаритами антенн. Кроме того, функциональные пеленгаторы успешно могут использоваться только в тех случаях, когда одновременное воздействие сигналов двух или более ИРИ на пеленгатор маловероятно.

1.3 Перспективы развития систем интегрированного многопозиционного радиомониторинга

Создание автоматизированных комплексных информационных систем на основе комплексирования каналов активных и пассивных средств радиолокации, за счет появляющихся новых системных эффектов в таких системах, позволяет обеспечить помехоустойчивость, увеличить точность определения координат ИРИ, уменьшить временные затраты на наведение средств стрельбы в условиях постановки активных помех. Комплексирование средств пассивной многопозиционной радиолокации с информационными каналами от активных РЛС оправдано рядом важных свойств [80]:

- системы пассивной радиолокации позволяют получать информацию скрытно, то есть без использования дополнительных средств активной радиолокации [81];

- в результате обработки данных системой пассивной радиолокации может быть получена не только координатная, но и другая дополнительная информация: и типе ИРИ, количественном составе группы ИРИ и т.д [82];

- средства пассивной радиолокации как элементы радиотехнической разведки компенсируют, по крайней мере, частично, снижение эффективности

работы радиолокационной системы в условиях радиоэлектронного её подавления [82,83].

Отмеченные достоинства являются весомым аргументом в пользу совместного использования активных и пассивных средств радиолокации для обнаружения и расчета координат ИРИ. Вместе с тем, пассивная радиолокационная система, ввиду зависимости от излучения ИРИ, как правило, не может претендовать на роль основной информационной системы и рассматривается как равноправная подсистема, тесно взаимодействующая с активной системой [84].

Разработка средств разведки воздушных целей ведется в области создания технических систем, которые позволяли бы эффективно обнаруживать и сопровождать ИРИ, оставаясь в то же время практически невидимыми в радиодиапазоне.

При рассмотрении различных вариантов достижения поставленной цели американские и французские ученые в конце 1990-х годов признали оптимальным вариантом использование интегрированного многопозиционного комплекса радиомониторинга [45,46].

В режиме активной локации РЛС облучает цели, а затем по отраженным сигналам получает о них необходимую информацию. Главным недостатком при этом является то, что РЛС может достаточно легко обнаруживаться техническими средствами разведки противника, а затем выводиться из строя как противорадиолокационными ракетами, так и другими средствами поражения.

В многопозиционном режиме РЛС работает не на излучение, а только на приём (используется как пассивная), извлекая информацию о цели из отраженных сигналов, когда та облучается другой станцией, находящейся в иной зоне пространства. Однако хотя при этом способе и обеспечивается более высокая живучесть РЛС, для выполнения поставленных перед ней задач требуется использование ещё ряда станций, которые также могут быть выведены из строя [47].

При применении нового нетрадиционного метода пассивной многопозиционной радиолокации информацию о воздушных целях предполагается получать с помощью специализированной приёмной станции из отраженных от воздушных целей сигналов широковещательных телевизионных или УКВ-радиопередатчиков, функционирующих в районе полётов. Таким образом, полностью отпадает необходимость в активных РЛС. Излучения радио- и телевизионных средств, работающих практически круглосуточно, обеспечат перекрытие околоземного пространства на значительных удалениях. Приёмная станция будет обнаруживать, распознавать и сопровождать такие ИРИ, как, например, самолёты, вертолёты, крылатые ракеты путём выделения и обработки отражённых от них сигналов.

Достоинства нового способа обнаружения воздушных целей для районов с высокоразвитой инфраструктурой теле- и радиовещания очевидны. Во-первых, широко разветвленная сеть телевизионных передатчиков и ретрансляторов, в отличие от находящихся на вооружении РЛС, делает практически бессмысленным использование против них противорадиолокационных ракет и других средств поражения. Во-вторых, поскольку приёмные станции не работают на излучение и являются мобильными, их обнаружение и уничтожение представляет собой трудновыполнимую задачу.

Причины использования именно телевизионных и УКВ-радиопередатчиков обусловлены следующими факторами. Как известно, значительная часть современных РЛС работает в диапазоне метровых волн. Особенность этого диапазона, с точки зрения специалистов в области радиолокации, состоит в том, что он является оптимальным в плане получения информации о точечных целях (их наличии, классе, координатах, скоростях движения и т.д.). Точечными называют цели, размеры которых незначительно увеличивают длительность отраженного от них сигнала по сравнению с облучающим (зондирующим). К их числу относят самолеты, танки, корабли малого водоизмещения и автомобили. Как известно, сигналы телевизионных станций в большинстве стран мира передаются также в метровом диапазоне

радиоволн. При этом для специалистов в области обработки радиолокационной информации телевизионные видеосигналы представляются более информативными как с точки зрения определения относительной скорости движения их источника, так и измерения расстояния до него. Примерно то же самое можно сказать и о сигналах широковещательных УКВ-радиостанций, работающих в режиме фазовой модуляции (ФМ). Таким образом, по мнению американских и французских ученых, метод пассивной многопозиционной радиолокации может успешно использоваться для обнаружения воздушных целей и слежения за ними.

Претворение в жизнь данного способа обнаружения воздушных целей потребовало решения ряда технических проблем. Одной из основных, которую, по мнению западных ученых, необходимо решить разработчикам, является выделение отраженных от цели сигналов на фоне прямых сигналов теле- и радиопередатчиков (ослабление уровня сигнала составляет $10^4 - 10^7$ раз). Кроме того, для определения угловых координат целей требуется аппаратура высокоскоростного измерения и обработки амплитудных и фазовых характеристик сигналов, принятых от нескольких антенн, обеспечивающих работу станции. В результате указанные факторы и обусловили то, что до появления процессоров со сверхвысоким быстродействием теоретические исследования в области пассивной многопозиционной радиолокации не находили практического воплощения.

Со второй половины 1990-х годов в США и Франции благодаря успехам в создании нового поколения микропроцессорной техники с высоким быстродействием исследования в данной области перешли в плоскость НИОКР.

В США фирма Lockheed Martin Mission Systems по заказу министерства обороны США изготовила экспериментальный образец приёмной станции для новой системы на основе технологии (метода) Passive Coherent Location (PCL), получившей название "Silent Sentry SystemTM". В состав этой РЛС входят антенная и приёмная системы, разработанные Lockheed Martin, высокопроизводительные средства обработки информации на базе

компьютеров SG2000 Silicon Graphics, программно-алгоритмическое обеспечение и средства визуализации фирмы Autometric Edge Product Family. Первые испытания по обнаружению и сопровождению самолётов с эффективной площадью рассеяния около 10 м^2 на дальностях до 180 км проводились в воздушном пространстве аэродрома Даллеса (Вашингтон) в конце 1998 года. Источником излучения была радиовещательная станция УКВ-диапазона, расположенная на удалении 50 км от приёмной. По результатам испытаний американские специалисты в настоящее время проводят доработку станции, чтобы она могла решать задачи идентификации воздушных целей, а дальность их обнаружения и сопровождения увеличилась до 220 км. Предполагается, что в случае обеспечения обработки сигналов от нескольких облучающих широковещательных передатчиков (не менее трех) можно будет обнаруживать и сопровождать до 200 воздушных целей одновременно. В настоящее время прорабатывается концепция установки приёмной станции «Silent Sentry SystemTM» на самолёты и беспилотные летательные аппараты. Кроме того, предварительные оценки результатов испытаний показали, что она может быть эффективно использована даже в системах предупреждения о ракетном нападении.

Во Франции работы по созданию системы разведки воздушных целей проводятся в рамках программы «Дарк» головным разработчиком – фирмой Томсон-CSF. Недавно завершены испытания экспериментального образца приёмной станции «Дарк» в стационарном варианте. Станция, которая размещалась в Палезо (пригород Парижа), выполняла работу обнаружения самолётов, совершавших полёты с парижского аэропорта Орли. Радиолокационная информация о целях извлекалась из переотраженных сигналов телевизионного передатчика, размещенного на Эйфелевой башне (расстояние от приёмной станции свыше 20 км), а также телевизионных станций в городах Бурже и Осер, более чем в 180 км от Парижа. Данные о точности измерения координат и скорости движения воздушных целей не стали достоянием гласности, однако по заявлению руководителей проекта, они

сопоставимы с аналогичными показателями классических РЛС обзора воздушного пространства.

Согласно планам компании в ближайшее время работы по созданию новой системы будут направлены на повышение технических характеристик приёмных трактов и выбор наиболее эффективной операционной системы вычислительного комплекса станции [48,49]. Одним из наиболее убедительных аргументов в пользу этой системы, по мнению разработчиков, является невысокая стоимость, так как в ходе её создания применяются достаточно отработанные технологии в области радио- и телевидения. В частности, при проведении эксперимента в приёмной станции использовались директорные антенны «Уда-Яги» типа «волноводный канал». После доводки прототипа приёмной станции «Дарк» в 2001 – 2003 годах планировалось провести её комплексные испытания.

В начале 2000 года стало известно, что на аналогичных принципах создана новая РЛС в Китае. Специалисты американского разведывательного управления заявляют, что китайская РЛС позволяет достоверно обнаруживать и сопровождать такие малозаметные самолёты, как F-117 и F-22. Однако, точных сведений о научно-технических принципах технологии PCL пока нет. Как показали результаты экспресс-анализа возможность создания систем, аналогичных технологии PCL, существует на основе использования сверхдлинного когерентного накопления сигналов, методов спектрального анализа и прикладной теории фракталов и детерминированного хаоса. В РФ комплекс экспериментальных работ по развитию методов и средств пассивной локации развернут в НИИРФИ на базе установки «Струна-1».

Однако, одним из наиболее важных критериев эффективности работы пассивных комплексов контроля радиоэлектронной обстановки, является точность определения координат источников радиоизлучения. В реальных условиях существенное влияние на точность измерения координат, при работе РДМ, оказывают погрешности измерения времени прихода сигнала на каждой из станций, входящих в состав комплекса [50]. При этом необходимо отметить,

что погрешности измерения обусловлены многими факторами, не всегда поддающимися учёту [51,52,53].

В настоящее время перспективным направлением повышения эффективности систем противовоздушной обороны (ПВО) является объединение активных и пассивных средств радиомониторинга в единую систему. Совместное использование активных и пассивных средств радиомониторинга позволяет получить интегрированную систему, обладающую информативной избыточностью [54]. Использование таких новых интегрированных средств радиомониторинга, использующих в своей работе преимущества как активных, так и пассивных средств, может привести к значительным преобразованиям в области обнаружения и слежения за ИРИ, и стать одними из наиболее эффективных [55].

1.4 Уточнение целей и задач исследования

Как следует из пункта 1.1, пассивные средства радиомониторинга обладают рядом преимуществ, таких как скрытность работы, способность определять и классифицировать сигналы ИРИ, однако, в то же самое время, точность определения координат ИРИ ими остается довольно низкой и зачастую является недостаточной для поставленных задач.

В пункте 1.2 рассмотрены основные принципы построения и использования активных средств радиомониторинга. Было выяснено, что активные средства обладают гораздо более высокой точностью определения координат ИРИ, помехоустойчивостью, но, в то же самое время, являются очень уязвимыми для современных средств нападения и могут быть достаточно легко выявлены и уничтожены.

В пункте 1.3 проведен анализ современных тенденций развития как активных, так и пассивных средств радиомониторинга. На основе проведенного анализа было установлено, что интеграция обоих средств мониторинга

позволит использовать преимущества обеих типов систем и, что является одним из главных, существенно повысить точность определения координат ИРИ интегрированным комплексом радиомониторинга.

Приведены существующие методы определения координат ИРИ, используемые в КПРМ. Данные методы хорошо известны, апробированы и широко используются. Тем не менее, они имеют существенные недостатки.

Триангуляционный (угломерный) метод обладает большой погрешностью результатов в силу невозможности обеспечения высокой точности определения пеленгов (азимута и угла места) на цель. Погрешность определения координат в триангуляционном методе растет с увеличением дальности до ИРИ. Вторым недостатком данного метода являются «ложные пересечения» пеленгов при насыщенной РЭО.

Разностно-дальномерный метод является наиболее известным и применяемым методом определения местоположения ИРИ в пассивных системах. Как следует из сравнительного анализа известных пассивных радиолокационных комплексов, выполненного в пункте 1.1, РДМ применяется практически во всех подобных системах в силу высокой точности результатов в сравнении с триангуляционным методом. Высокая точность результатов обусловлена малой погрешностью определения входных параметров метода – временных задержек.

Однако, на величину ошибок определения временных задержек существенно влияют условия распространения радиоволн. В зависимости от диапазона частот, погрешность измерения временных задержек, обусловленная условиями распространения радиоволн, может достигать 25 мкс, что существенно ограничивает возможности РДМ. При дальнем тропосферном распространении погрешность определения координат ИРИ согласно РДМ может превышать аналогичную погрешность при использовании триангуляционного метода.

Таким образом, разработка способов повышения точности определения координат ИРИ интегрированными многопозиционными комплексами является

актуальной задачей для систем радиомониторинга.

С учетом вышесказанного, сформулируем следующие задачи исследования, необходимые для разработки способов повышения точности определения координат ИРИ:

- разработать и исследовать новый метод определения координат ИРИ, основанный на использовании весовых коэффициентов при решении экстремальной постановки РДМ на основе минимизации квадратичного функционала в целях повышения точности определения координат ИРИ;

- разработать и исследовать новый метод совместной обработки информации от комплекса пассивного радиомониторинга (КПРМ) и высотомера в целях повышения точности определения координат ИРИ;

- разработать и исследовать новый метод совместной обработки информации от КПРМ и активной РЛС в целях повышения точности определения координат ИРИ;

- разработать модифицированный вычислительный метод для уменьшения времени расчета координат ДРВ при несущественном ухудшении точности расчета;

- с помощью теории параметрической чувствительности разработать способ определения станции, вносит наибольшую погрешность, что позволит исключить ее из расчетов в случае, если одна из координат ИРИ остается неизменной;

- разработать систему обработки информации для системы радиомониторинга на основе разработанных способов повышения точности и скорости расчета координат ИРИ;

Выводы по первому разделу

1. Рассмотрены основные технические особенности существующих систем радиотехнического мониторинга. Выяснено, что как активные, так и

пассивные РЛС могут выступать источником информации в системах радиомониторинга.

2. Установлено, что классические радиолокационные системы обладают рядом недостатков, ограничивающих их применение и ставящим под вопрос перспективы их дальнейшего развития.

3. Выполнен анализ радиолокационных систем различных типов. Установлено, что многопозиционные пассивные комплексы эффективно решают проблемы, возникающие перед активными радиолокаторами.

4. Установлено, что триангуляционный и разностно-дальномерный – основные методы, используемые для определения координат многопозиционными пассивными комплексами радиомониторинга. Показано, что данные методы имеют недостатки.

5. Основным недостатком триангуляционного метода является высокая погрешность результатов в силу невозможности обеспечения достаточной точности определения пеленга. В свою очередь, точность РДМ существенно зависит от условий распространения сигнала

6. Указанные недостатки, в совокупности с постоянным ростом требований к точности нахождения местоположения ИРИ, делают актуальной задачу повышения точности определения координат.

РАЗДЕЛ 2

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ИРИ В РДС И ИХ АНАЛИЗ

2.1 Разработка метода определения координат ИРИ в разностно-дальномерной системе на основе модифицированного метода Ньютона

2.1.1 Решение задачи разностно-дальномерной координатометрии модифицированным методом Ньютона

В настоящее время широкое распространение получили беспойсковые по пространству пассивные комплексы автоматического обнаружения и построения маршрутов перемещения воздушных целей по излучениям их бортовых радиоэлектронных средств на базе РДМ измерения координат [50].

Принцип действия таких систем основан на измерении разницы моментов прихода сигналов на станции, входящие в состав комплекса. Как правило, в состав комплекса входит четыре станции L_1 , L_2 , L_3 , и C (рис. 2.1). Это позволяет обеспечить однозначное решение задачи по измерению трех координат воздушных целей в круговом пространственном секторе.

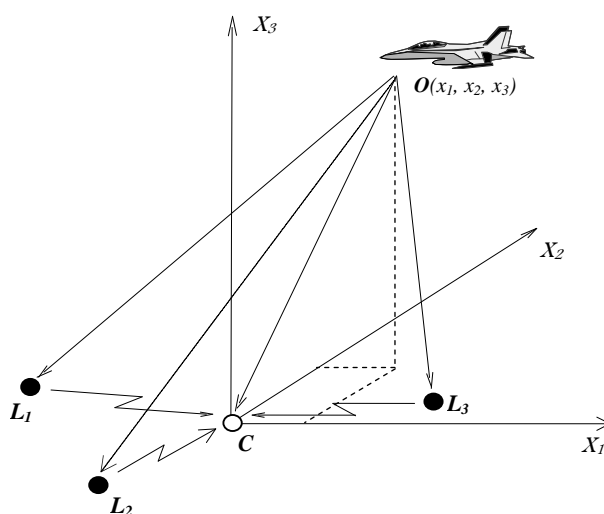


Рис. 2.1. Взаимное расположение комплекса пассивной радиолокации и ИРИ

Координаты целей в текущий момент времени описываются системой трех уравнений (2.1).

$$\begin{aligned}\tau_1 &= \frac{1}{c}(OL_1 + CL_1 - OC); \\ \tau_2 &= \frac{1}{c}(OL_2 + CL_2 - OC); \\ \tau_3 &= \frac{1}{c}(OL_3 + CL_3 - OC),\end{aligned}\tag{2.1}$$

где $\tau_{1,2,3}$ - задержки времени прихода сигнала от цели на центральную станцию С через боковые станции L_1, L_2, L_3 .

OL_i - расстояния между ИРИ и боковыми станциями;

CL_i - расстояния между боковыми станциями и центральной;

OC - расстояние между ИРИ и центральной станцией.

Выразив соотношения (2.1) в системе координат положения станций и ИРИ, получим систему нелинейных уравнений, в которой известны все величины, кроме координат положения ИРИ $x = (x_1, x_2, x_3)^T$

$$\begin{aligned}F_1(x) &= \frac{1}{c} \cdot \left(\sqrt{(x_1 - x_1^1)^2 + (x_2 - x_2^1)^2 + (x_3 - x_3^1)^2} + D_1 - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} \right) - \tau_1 = 0; \\ F_2(x) &= \frac{1}{c} \cdot \left(\sqrt{(x_1 - x_1^2)^2 + (x_2 - x_2^2)^2 + (x_3 - x_3^2)^2} + D_2 - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} \right) - \tau_2 = 0; \\ F_3(x) &= \frac{1}{c} \cdot \left(\sqrt{(x_1 - x_1^3)^2 + (x_2 - x_2^3)^2 + (x_3 - x_3^3)^2} + D_3 - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} \right) - \tau_3 = 0,\end{aligned}\tag{2.2}$$

где $D_i = \overline{L_i C}$, $i = 1, 2, 3$.

Вектор $x^i = (x_1^i, x_2^i, x_3^i)^T$, $i = 1, 2, 3$ определяет положение i -той станции в трехмерном пространстве R^3 .

При создании математического и программного обеспечения для комплексов пассивной локации также весьма остро стоит проблема сокращения объема вычислительных операций [51,52].

В общем случае методов решения систем нелинейных уравнений $F(x) = 0$, гарантирующих получение приемлемого результата, не существует. При условии выполнения определенных требований к свойствам нелинейных

уравнений эффективным методом решения является итеративный метод Ньютона.

Для реализации метода Ньютона необходимо получить аналитические выражения для расчета матрицы частных производных (матрицы Якоби)

$$F'(x_k) = \begin{vmatrix} \frac{\partial F_1(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_1} & \frac{\partial F_1(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_2} & \frac{\partial F_1(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_3} \\ \frac{\partial F_2(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_1} & \frac{\partial F_2(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_2} & \frac{\partial F_2(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_3} \\ \frac{\partial F_3(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_1} & \frac{\partial F_3(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_2} & \frac{\partial F_3(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_3} \end{vmatrix}, \quad (2.3)$$

где

$$\frac{\partial F_j(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_i} = \frac{x_i - x_i^j}{\sqrt{\sum_{i=1}^3 (x_i - x_i^j)^2}} - \frac{x_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^3 x_i^2}}, \quad i=1..3, j=1..3. \quad (2.4)$$

В рассматриваемой области $\Omega \in \mathbb{R}^3$ трехмерного пространства \mathbb{R}^3 вектор-функция $F(x) = (F_1(x), F_2(x), F_3(x))^T$, имеет все частные производные 1-го порядка. Вычислительную процедуру метода Ньютона можно легко получить из разложения в ряд Тейлора в точке x^* левых частей системы:

$$F(x^*) = F(x_k) + F'(x_k)(x^* - x_k) + R(x^* - x_k), \quad (2.5)$$

Предполагая, что x^* - есть решение системы, правую часть (2.3) приравняем нулю, и, пренебрегая остаточным членом $R(x^* - x_k)$, получим схему Ньютона:

$$F(x_k) + F'(x_k)(x^* - x_k) = 0. \quad (2.6)$$

Разрешая уравнение (2.6) относительно нового приближения x_{k+1} , получим классическое представление метода:

$$x_{k+1} = x_k - F'(x_k)^{-1} F(x_k). \quad (2.7)$$

Итерации возможны, если матрица частных производных $F'(x_k)$ - невырожденная. Эффективность метода Ньютона состоит в том, что имеет

место оценка [2]:

$$\|x_{k+1} - x^*\| \leq c \|x_k - x^*\|^2 \quad (2.8)$$

показывающая, что близость к точному решению на $(k+1)$ -ой итерации пропорциональна квадрату ошибки k -ой итерации, т.е. итерационный процесс (2.5) имеет квадратичную скорость сходимости [53,54].

Включая в ряд Тейлора члены второго порядка, можно получить вычислительную схему, обладающую кубической сходимостью:

$$x_{k+1} = x_k - \left[I - \frac{1}{2} F'(x_k)^{-1} F''(x_k) F'(x_k) F(x_k) \right]^{-1} F(x_k)^{-1} F(x_k), \quad (2.9)$$

Для реализации этой схемы потребуется найти n^2 частных производных первого порядка и n^3 частных производных второго порядка. Кроме того, выполнить 2 обращения матриц. При таком объеме вычислительных операций даже увеличение скорости сходимости не позволяет этой схеме конкурировать с итерациями первого и второго порядка.

Менее затратной схемой третьего порядка является схема:

$$x_{k+1} = x_k - F'(x_k)^{-1} \left[F(x_k) + F(x_k - F'(x_k)^{-1} F(x_k)) \right], \quad (2.10)$$

которая фактически содержит 2 шага с одной и той же обратной матрицей.

Одной из простейших модификаций метода Ньютона является следующая итерация ([2], стр. 304)

$$x_{k+1} = x_k - \omega [F'(x_k) + \lambda I]^{-1} F(x_k), \quad k = 0, 1, \dots, n \quad (2.11)$$

где ω, λ - фиксированные постоянные.

В случае $\omega = 1$ и $\lambda = 0$, то (2.11) сводится к классическому методу Ньютона.

Итерация по формуле (2.9) не обладает сверхлинейной скоростью сходимости метода Ньютона.

Одно из требований сходимости итерационного процесса состоит в пошаговом уменьшении некоторой нормы, т.е. должно выполняться неравенство [54]

$$\|F_{k+1}(x)\| \leq \|F(x_k)\|, \quad k = 0, 1, \dots, n. \quad (2.12)$$

Метод Ньютона не гарантированно удовлетворяет этому условию даже в случае одной переменной. Простейшей модификацией метода Ньютона является следующая итерация

$$x_{k+1} = x_k - \omega_k F'(x_k)^{-1} F(x_k), \quad k = 0, 1, \dots, n, \quad (2.13)$$

для которой множитель ω_k выбирается так, чтобы выполнялось условие (10). Достаточные условия существования таких коэффициентов даны в [55].

При плохой обусловленности матрицы производных $F'(x)$ подбором величины λ в итерации (2.9) можно добиться невырожденности результирующей матрицы $F'(x) + \lambda I$.

Таким образом, итерации типа (2.9) позволяют решить проблемы применения метода Ньютона, связанные со сходимостью метода и возможной вырожденностью матрицы частных производных $F'(x)$. Существуют и другие подходы, решающие вышеуказанные трудности практического использования модификаций метода Ньютона.

2.1.2 Исследование сходимости решения задачи разностно-дальномерной координатометрии методом Ньютона с однократно рассчитываемой матрицей Якоби

Избежать операции обращения матрицы Якоби можно, если итерационный процесс представить в виде [56]

$$F(x^k) + F'_x(x^{k+1} - x^k) = 0. \quad (2.14)$$

Для нахождения x^{k+1} необходимо решить систему линейных алгебраических уравнений (2.1), каноническое представление которой имеет вид:

$$F'_x(x^k)x^{k+1} = F'_x(x^k)x^k - F(x^k) = 0. \quad (2.15)$$

Для обеспечения сходимости итераций (2.1) можно ввести множитель ω^k и выбирать его так, чтобы обеспечить выполнение условий сходимости $\|F(x^{k+1})\| \leq \|F(x^k)\|$. С учетом множителя ω^k Итерационный процесс принимает вид:

$$F'_x(x^k)x^{k+1} = F'_x(x^k)x^k - \omega^k F(x^k) = 0. \quad (2.16)$$

Выбором ω^k можно изменять величину вектора правой части линейной системы уравнений. Однако, остается возможность вырожденности матрицы Якоби либо близости к вырожденности (т.е. $\det F'_x(x^k) \approx 0$), снижающей устойчивость решения к различным погрешностям [57,58].

В этом случае можно воспользоваться модификацией матрицы Якоби следующим образом

$$G(x^k) = F'_x(x^k) + \lambda_k I \quad (2.17)$$

и подбором параметра λ_k превратить результирующую матрицу $G(x^k)$ в диагоналедоминантную, что позволит улучшить обусловленность системы уравнений.

Модификация итерационного процесса принимает вид:

$$[F'_x(x) + \lambda^k I]x^{k+1} = [F'_x(x^k) + \lambda I]x^k - \omega^k F(x^k), \quad (2.18)$$

позволяющий гарантировать получение приемлемого решения системы (2).

После нескольких итераций (2.18) и вхождении приближений x^{k+1} в область сходимости метода Ньютона, можно вернуться к классической схеме (2.13), увеличив тем самым скорость сходимости к точному решению исходной системы (2.2).

Для локальной сходимости метода Ньютона достаточно, чтобы спектральный радиус матрицы $G = I - A^{-1}F'_x(x^*)$ был строго меньше единицы, т.е.

$$R = \rho\{I - [F'_x(x^*)]^{-1}F'_x(x^*)\} < 1, \quad (2.19)$$

Чем меньше величина R , тем быстрее сходимость итераций (2.13).

Пусть $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ – собственные значения матрицы

$$G = I - [F'_x(x^*)]^{-1} F'_x(x^*). \quad (2.20)$$

Спектральный радиус матрицы G определим как $\rho = \max_i \{\lambda_1, \dots, \lambda_n\}$

$$\rho = \max_i \{\operatorname{Re} \lambda_1, \dots, \operatorname{Re} \lambda_n\}, \quad (2.21)$$

где $\operatorname{Re} \lambda_i$ - действительная часть собственного значения λ_i , $i = \overline{1, n}$.

При решении координатно-трассовой задачи сокращение вычислительных операций достигается следующим путем:

- использованием модифицированного метода Ньютона, связанного с уменьшением числа пересчета матрицы частных производных [58];
- исключением из итеративного процесса одного из уравнений системы (2.1) в случае, если одна из координат ИРИ не меняется (например, высота полета), а также при достижении заданной точности какой-либо из координат положения ИРИ [58,59].

2.1.3 Анализ точности определения координат ИРИ разработанным методом с помощью компьютерного моделирования

Решение системы уравнений (2.2) методом Ньютона было проведено в среде компьютерного моделирования MathCAD, в результате которого были получены координаты трассы на основе экспериментальных данных измерения и последующей фильтрации задержек времени прихода сигнала на приемные пункты комплекса пассивной радиолокации. Трасса, представленная на рис. 2.2, построена при расчете матрицы частных производных на каждом шаге итерации [59].

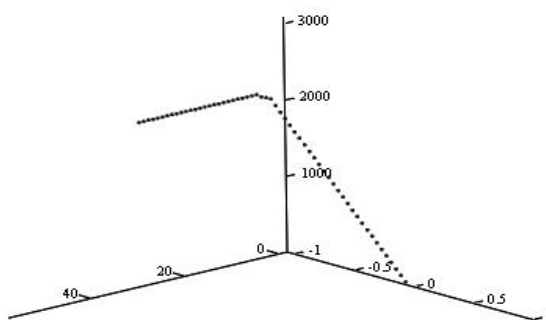


Рис. 2.2 Трасса ИРИ, построенная при расчете матрицы частных производных на каждом шаге итерации

Кроме того, был проведен анализ возможности сокращения времени расчетов за счет использования матрицы (2.3) без ее перерасчета на каждом итерационном шаге в результате чего было установлено, что возможно использование одной и той же матрицы для нескольких шагов итерации без существенного ухудшения точности для фиксированного количества итераций [60]. Результаты расчетов приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Зависимость точности определения координат ИРИ от количества итераций при пересчете матрицы Якоби

$\varepsilon = x_{k+1} - x_k$, М	Количество итераций при пересчете матрицы Якоби на каждом шаге итерации	Количество итераций при пересчете матрицы Якоби на первых двух шагах итерации
10	2	2
0.001	3	3
0.000001	4	4
0.0000001	4	5

Таким образом, в подразделе 2.1, разработан метод определения координат ИРИ путем численного решения нелинейной задачи разностно-дальномерной координатометрии, на основе модифицированного метода Ньютона.

Показана целесообразность использования одного и того же определителя матрицы частных производных для двух-трех шагов итерации что

позволяет в 2-3 раза сократить время расчета при удовлетворительной точности вычислений.

Предложенный метод позволяет строить непрерывные трассы воздушных целей при кратковременной потере излучаемых ими сигналов. Допустимый временной интервал отсутствия сигналов равен 3-5 периодам сканирования антенной системы, установленной на борту цели.

2.2 Анализ нелинейной задачи разностно-дальномерной координатометрии при помощи функций параметрической чувствительности

2.2.1 Использование функций параметрической чувствительности для определения абсолютной погрешности определения координат ИРИ

Важной задачей при разработке систем пассивной радиолокации является задача определения погрешности вычисления координат ИРИ. В случае нахождения ИРИ на различном удалении от разнесенной системы пассивной радиолокации, одним из эффективных способов определения абсолютной погрешности измерения координат является метод функций чувствительности, связанный с изучением влияния изменения входных параметров на изменение выходных. Под входными параметрами в системах пассивной радиолокации подразумеваются временные задержки прихода сигнала ИРИ на станции комплекса, а под выходными – вычисляемые комплексом координаты ИРИ [61].

При изучении динамических систем часто используется понятие однозначного соответствия между векторами входных и выходных параметров, которое может быть определено посредством дифференциальных уравнений, уравнений состояния или каким-либо иным путём. Однако, при практических расчетах входные параметры могут быть определены только с некоторой точностью. Кроме того, параметры системы изменяются в зависимости от

внешних условий и во времени, то есть инженерные расчеты имеют дело с номинальными значениями параметров и с соответствующими допусками. В связи с этим, вместо однозначного соотношения между номинальными входными и выходными параметрами практичнее рассматривать соотношение областей изменения входных и выходных параметров относительно своих номинальных значений, которое и дает информацию относительно чувствительности системы к возмущениям [62,63].

В состав рассматриваемой системы входят четыре пространственно-разнесенных станции C , R , L и Q (рис. 2.1), а для определения координат используется разностно-дальномерный метод, основанный на измерении разности времен прихода сигнала от ИРИ на боковые станции по отношению к центральной и построении по ним соответствующих гипербол. Местоположение ИРИ – точка пересечения трех гиперболоидов вращения [63].

Для определения координат объекта в текущий момент времени необходимо решить систему гиперболических уравнений (2.1).

Система уравнений (2.1) выражается через координаты ИРИ и станций комплекса в виде:

$$\begin{aligned} F_L &= \frac{1}{c}(\sqrt{(x_1 - x_{1L})^2 + (x_2 - x_{2L})^2 + (x_3 - x_{3L})^2} + D_L - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}) - \tau_L = 0; \\ F_R &= \frac{1}{c}(\sqrt{(x_1 - x_{1R})^2 + (x_2 - x_{2R})^2 + (x_3 - x_{3R})^2} + D_R - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}) - \tau_R = 0; \\ F_Q &= \frac{1}{c}(\sqrt{(x_1 - x_{1Q})^2 + (x_2 - x_{2Q})^2 + (x_3 - x_{3Q})^2} + D_Q - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}) - \tau_Q = 0; \\ D_L &= \overline{LC}, D_R = \overline{RC}, D_Q = \overline{QC}, \end{aligned} \quad (2.22)$$

где x_1, x_2, x_3 - координаты цели;

x_{1L}, x_{2L}, x_{3L} - координаты станции L;

x_{1R}, x_{2R}, x_{3R} - координаты станции R;

x_{1Q}, x_{2Q}, x_{3Q} - координаты станции Q.

Пусть известна σ_i^{τ} погрешность (с.к.о.) измерения времен задержек $\tau_{L,R,Q}$ поступления сигнала на станции.

Координаты ИРИ вычисляются путем нахождения корней системы

уравнений (2.22) [64]. При условии точного измерения времени τ_0 , получим точное решение системы (2.22) \vec{x}_0 . Необходимо получить оценку координат ИРИ при ошибочных величинах компонент вектора $\vec{\tau} = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]$, где $\tau_1 = \tau_L$, $\tau_2 = \tau_Q$, $\tau_3 = \tau_R$. С этой целью разложим вектор \vec{x} в ряд Тейлора в окрестности точных координат ИРИ \vec{x}_0 , ограничиваясь его линейной частью [3]:

$$\vec{x}(\tau_0 + \Delta\tau) = \vec{x}(\tau_0) + \left. \frac{\partial \vec{x}}{\partial \tau} \right|_{\tau=\tau_0} (\Delta\tau), \quad (2.23)$$

или

$$\vec{x}(\tau_0 + \Delta\tau) - \vec{x}(\tau_0) = \left. \frac{\partial \vec{x}}{\partial \tau} \right|_{\tau=\tau_0} (\Delta\tau) \quad (2.24)$$

Величина смещения Δx координаты, вызванная погрешностью измерения времени задержки на величину $\Delta\tau$ определяется через коэффициенты чувствительности следующим соотношением [65]:

$$\Delta \vec{x}(\tau_0 + \Delta\tau) = \left. \frac{\partial \vec{x}}{\partial \tau} \right|_{\tau=\tau_0} (\Delta\tau) \quad (2.25)$$

где

$$\left. \frac{\partial \vec{x}}{\partial \tau} \right|_{\tau=\tau_0} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial \tau_1} & \frac{\partial x_1}{\partial \tau_2} & \frac{\partial x_1}{\partial \tau_3} \\ \frac{\partial x_2}{\partial \tau_1} & \frac{\partial x_2}{\partial \tau_2} & \frac{\partial x_2}{\partial \tau_3} \\ \frac{\partial x_3}{\partial \tau_1} & \frac{\partial x_3}{\partial \tau_2} & \frac{\partial x_3}{\partial \tau_3} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

матрица первых производных координат ИРИ по временам задержек $\vec{\tau} = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]$ (матрица Якоби) [65,66].

Каждая координата x_i вектора \vec{x} получит соответствующее отклонение в связи с ошибками измерения времени задержки, а именно:

$$x_i(t_0 + \Delta\tau) = x_i(t_0) + \sum_{j=1}^3 \frac{\partial x_i}{\partial \tau_j} \Delta\tau_j, \quad i=1...3 \quad (2.27)$$

Соотношение (2.27) содержит ошибку измерения координаты ИРИ, пропорциональную ошибке измерения времени задержки $\Delta\tau_j$, коэффициентом

пропорциональности при этом является функция чувствительности $\frac{\partial x_i}{\partial \tau_j}$ координаты x_i к изменению времени задержки. Зная функцию чувствительности и измеренную временную задержку, можно найти значение абсолютной погрешности вычисляемой координаты [67].

Рассмотрим вариант симметричного расположения станций и источник радиоизлучения, движущийся вдоль трассы (рис. 2.3).

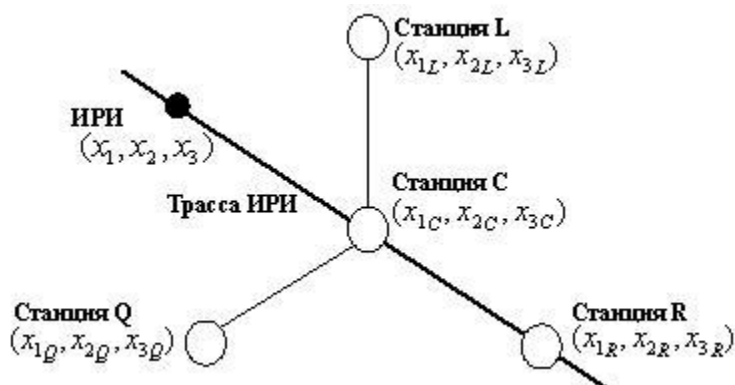


Рис. 2.3 Симметричное расположение станций с трассой источника радиоизлучения

Рассчитаем матрицы Якоби при $\delta\tau_i = 15\%$, $i = \overline{1,3}$ при положении ИРИ над станциями L , Q , R , а также над станцией C и за станцией C симметрично станции R (как показано на рис. 2.3). Результаты расчета приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Матрицы Якоби при положении ИРИ над станциями L , Q , R , а также над станцией C и за станцией C симметрично станции R , $\delta\tau_i = 15\%$, $i = \overline{1,3}$

	Над станцией L (измерение τ_1)			Над станцией Q (измерение τ_2)			Над станцией R (измерение τ_3)		
	$\frac{\partial x_i}{\partial \tau_1}$	$\frac{\partial x_i}{\partial \tau_2}$	$\frac{\partial x_i}{\partial \tau_3}$	$\frac{\partial x_i}{\partial \tau_1}$	$\frac{\partial x_i}{\partial \tau_2}$	$\frac{\partial x_i}{\partial \tau_3}$	$\frac{\partial x_i}{\partial \tau_1}$	$\frac{\partial x_i}{\partial \tau_2}$	$\frac{\partial x_i}{\partial \tau_3}$
x_1	5,676*10³	5,482*10 ⁵	2,309*10 ⁵	2,107*10 ⁴	6,424*10⁴	2,088*10 ⁵	3,093*10 ⁵	4,167*10 ⁵	1,316*10⁴

x_2	1,703*10⁴	1,76*10 ⁶	2,353*10 ⁵	2,661*10 ⁵	2,452*10⁵	1,567*10 ⁵	1,2*10 ⁵	2,17*10 ⁵	1,236*10⁴
x_3	3,867*10⁵	3,002*10 ⁶	5,212*10 ⁴	3,184*10 ⁵	1,116*10⁵	1,497*10 ⁴	5,852*10 ⁵	3,89*10 ⁵	3,07*10⁵

Над станцией C				Симметрично станции R относительно станции C		
	$\frac{\partial x_i}{\partial \tau_1}$	$\frac{\partial x_i}{\partial \tau_2}$	$\frac{\partial x_i}{\partial \tau_3}$	$\frac{\partial x_i}{\partial \tau_1}$	$\frac{\partial x_i}{\partial \tau_2}$	$\frac{\partial x_i}{\partial \tau_3}$
x_1	4,218*10 ⁴	1,25*10 ³	1,705*10 ⁵	8,495*10 ⁴	6,398*10 ⁴	2,316*10 ⁵
x_2	1,593*10 ⁴	2,201*10 ⁵	1,075*10 ⁵	2,04*10 ⁵	2,828*10 ⁵	1,699*10 ⁵
x_3	5,223*10 ⁵	5,523*10 ⁴	8,116*10 ⁴	7,131*10 ⁵	7,628*10 ⁵	9,04*10 ⁵

Видно, что наименьшие значения коэффициенты чувствительности имеют при нахождении ИРИ над станцией C , то есть в центре системы. Во всех остальных случаях коэффициенты чувствительности имеют большие значения, и это будет проявляться тем сильнее, чем больше ИРИ удаляется от станций комплекса. Кроме того, из таблицы видно, что при нахождении ИРИ непосредственно над станциями L , Q , R коэффициенты чувствительности имеют минимальное значение по той временной задержке, которая определяется данной станцией. Это можно объяснить тем, что ошибка, вносимая в вычисление координат при изменении соответствующей временной задержке, будет мала при нахождении ИРИ над соответствующей станцией по сравнению с вносимой ошибкой в вычисление координат другими станциями.

Соответствующие случаю расположения станций комплекса и трассы, как показано на рис. 2.3, коэффициенты чувствительности K_x, K_y , [км/с] в зависимости от координат и относительной погрешности измерения времени задержки прихода сигнала, $\delta\tau_i = 15\%$, приведены на рис. 2.4 и рис. 2.5.

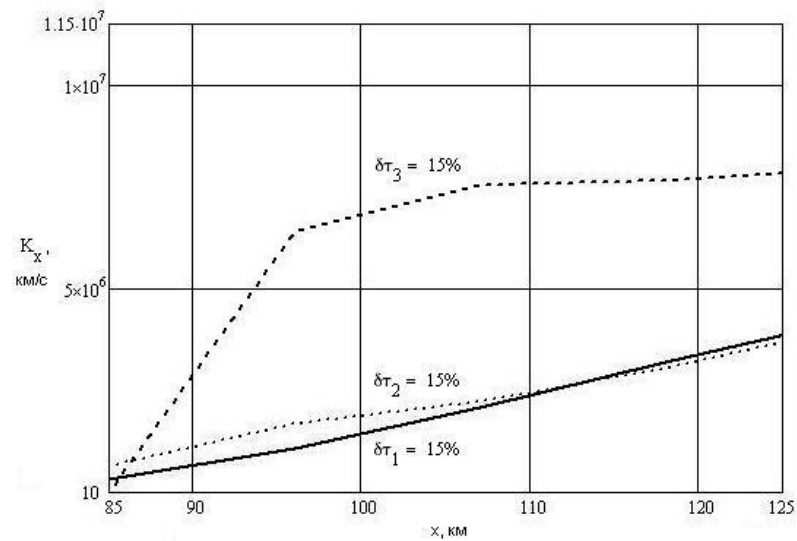


Рис. 2.4 Функции чувствительности K_x координаты x при движении по трассе при $\delta\tau_{1,2,3} = 15\%$ (функции чувствительности для $\delta\tau_3$ для совмещения графиков умножены на коэффициент 0,05)

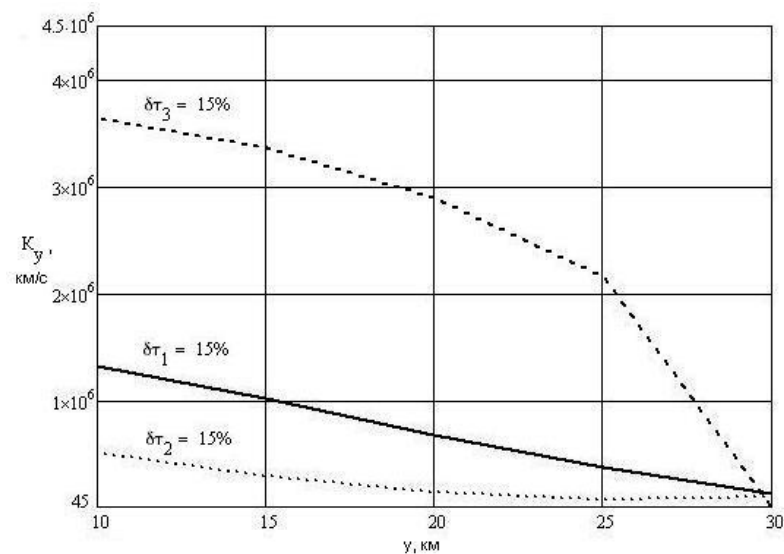


Рис. 2.5 Функции чувствительности K_y координаты y при движении по трассе при $\delta\tau_{1,2,3}=15\%$ (функции чувствительности для $\delta\tau_3$ для совмещения графиков умножены на коэффициент 0,2)

2.2.2 Применение функций параметрической чувствительности для сокращения количества уравнений РДМ

Поведение функций чувствительности свидетельствует о том, что относительно небольшие изменения значения временных задержек приводят к значительным изменениям вычисляемых координат, то есть возникновению значительных погрешностей вычисления координат [68]. Отсюда вытекает требование максимально точного измерения задержек времени прихода сигнала на станции комплекса. Кроме того, анализ этих зависимостей позволяет сделать вывод о существовании вблизи станций комплекса определенной зоны, коэффициенты чувствительности в которой имеют наименьшее значение и изменение их в этой зоне является незначительным. За пределами этой зоны функции чувствительности имеют рост, увеличивающийся по мере удаления от месторасположения станций [69].

При создании математического и программного обеспечения систем пассивной локации стоит проблема сокращения объема вычислительных операций для решения информационных задач. При решении координатно-трассовой задачи сокращение вычислительных операций достигается следующим путем [69,70]:

- использованием модифицированного метода Ньютона, связанного с уменьшением числа пересчета матрицы частных производных;
- исключением из итеративного процесса одного из уравнений системы (2) в случае, если одна из координат ИРИ не меняется (например, высота полета), а также при достижении заданной точности какой-либо из координат положения ИРИ.

Во втором случае важно определить - какое уравнение, а значит и измерения какой станции исключить из системы (2.2). Ответ на этот вопрос может дать анализ поведения функций чувствительности координат ИРИ относительно погрешности измерения времен задержки τ_i , $i = \overline{1,3}$.

При неизменной высоте (третьей координате) для сокращения времени вычислительного процесса следует исключить такую станцию, для которой величина суммарной чувствительности координат ИРИ $\sum_{i=1}^3 \frac{\partial x_i(t)}{\partial \tau_j}$ к ошибке

определения времени задержки τ_j будет наибольшей. Из таблицы 2.2 и рисунков 2.4, 2.5 видно, что при удалении ИРИ от станций комплекса по заданной на рис. 2.3 трассе, наибольшие значения будут иметь коэффициенты чувствительности при изменении $\delta\tau_3$, которая измеряется на станции R и, соответственно, именно её можно исключить из процесса расчета координат, что будет иметь два преимущества: позволит перейти от системы из трех уравнений к системе из двух уравнений, что сократит объем вычислений, а также повысит точность определения координат за счет исключения из процесса вычислений станции, которая имеет наибольший коэффициент чувствительности, а, следовательно, внесет наибольшую погрешность в вычисления.

Таким образом, в подразделе 2.2 показано, что определение коэффициентов чувствительности является достаточно эффективным способом оценки погрешности измерения координат разностно-дальномерным методом в системах пассивной радиолокации.

Получены зависимости коэффициентов чувствительности от координат воздушных целей и относительной погрешности измерения времени задержки прихода сигнала. Показано, что погрешности измерения координат растут с удалением от места расположения системы пассивной радиолокации.

На основе анализа суммарной чувствительности координат ИРИ к ошибке определения времени задержки предложен способ исключения одного из уравнений РДМ, позволяющий сократить объем вычислений и время расчета координат ИРИ при построении трасс воздушных целей путем.

2.3 Разработка метода определения координат ИРИ в РДС на основе критерия минимума взвешенной суммы квадратов ошибок и его анализ

2.3.1 Экстремальная постановка задачи определения координат ИРИ в РДС и ее решение

Одним из основных показателей эффективности работы пассивных комплексов контроля радиоэлектронной обстановки является точность определения координат ИРИ. В реальных условиях существенное влияние на точность измерения координат, при использовании РДМ, оказывают погрешности измерения времени прихода сигнала на каждой из станций, входящих в состав комплекса. Поэтому задача минимизации влияния погрешности измерения времен прихода сигнала на станциях комплекса на точность определения координат является актуальной [71].

Для оценки влияния погрешностей измерения времен прихода сигнала на точность определения координат ИРИ, рассмотрим комплекс, в состав которого входят четыре пространственно-разнесенных станции C, R, L и Q (рис. 2.1). Для определения координат объекта в текущий момент времени необходимо решить систему гиперболических уравнений (2.2) [72,73].

Задачу нахождения координат на основе РДМ можно сформулировать как экстремальную задачу на основе критерия минимума взвешенной суммы квадратов ошибок уравнений РДМ [74].

Примем: $\tau_1 = \tau_L, \tau_2 = \tau_Q, \tau_3 = \tau_R, \vec{\tau} = [\tau_1, \tau_2, \tau_3], \vec{x} = [x_1, x_2, x_3]$, тогда квадратичный функционал, оценивающий величину взвешенной суммы квадратов ошибок можно записать в виде:

$$\min J(x_1, x_2, x_3) = \sum_{i=1}^3 \left[\frac{1}{c} \left(\sqrt{(x_1 - x_1^i)^2 + (x_2 - x_2^i)^2 + (x_3 - x_3^i)^2} + D_i - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} \right) - \tau_i \right]^2 \rho_i \quad (2.28)$$

x_1^i, x_2^i, x_3^i - соответствующие координаты станций.

Пользуясь обозначениями системы (2.2), квадратичный функционал (2.28) перепишем в более компактном виде:

$$\min J(x_1, x_2, x_3) = \sum_{i=1}^3 \rho_i F_i^2 \quad (2.29)$$

Функционал $J(x_1, x_2, x_3)$ состоит из суммы взвешенных квадратичных функций с весовыми коэффициентами ρ_i , которые позволяют учесть влияние реальных погрешностей измерения задержек времени прихода сигнала каждой из станций комплекса, на точность определения координат ИРИ [75].

Сформулируем необходимые условия определения минимума функционала (2.29) в покомпонентном представлении [76]:

$$\begin{cases} \frac{\partial J(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_1} = 0 \\ \frac{\partial J(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_2} = 0 \\ \frac{\partial J(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_3} = 0 \end{cases} \quad (2.30)$$

где

$$\frac{\partial J(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_i} = 2 \left\{ \sum_{j=1}^3 F_j(x) \cdot \rho_j \cdot \frac{\partial F_j(x)}{\partial x_i} \right\} = 0 \quad i=1..3 \quad (2.31)$$

или

$$\begin{aligned} \frac{\partial J(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_i} = & 2 \left(\frac{1}{c} \left(\sqrt{(x_1 - x_1^1)^2 + (x_2 - x_2^1)^2 + (x_3 - x_3^1)^2} + D_1 - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} - \tau_1 \right) \cdot \rho_1 \cdot \frac{\partial F_1(x)}{\partial x_i} \right) + \\ & + \left(\frac{1}{c} \left(\sqrt{(x_1 - x_1^2)^2 + (x_2 - x_2^2)^2 + (x_3 - x_3^2)^2} + D_2 + \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} - \tau_2 \right) \cdot \rho_2 \cdot \frac{\partial F_2(x)}{\partial x_i} \right) + \\ & + \left(\frac{1}{c} \left(\sqrt{(x_1 - x_1^3)^2 + (x_2 - x_2^3)^2 + (x_3 - x_3^3)^2} + D_3 + \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} - \tau_3 \right) \cdot \rho_3 \cdot \frac{\partial F_3(x)}{\partial x_i} \right) \end{aligned}$$

$$i = 1..3$$

2.3.2 Анализ разработанного метода определения координат ИРИ в РДС при неравноточных измерениях разностей времен задержек прихода сигналов

Для оценки эффективности предлагаемого метода, произведем сравнение результатов расчета координат выполненных путем решения системы уравнений (2.2) (классическим методом) и методом на основе поиска минимума квадратичного функционала (2.28).

Расчеты проведем для двух случаев: когда одна из станций имеет

погрешность измерения задержки времени прихода сигнала большую, чем остальные, и когда две станции одновременно имеют погрешность измерения задержки времени прихода сигнала. Взаимное расположение станций и ИРИ для первого варианта представлено на рис. 2.6 а., а для второго варианта на рис. 2.6 б. Результаты расчетов приведены в таблицах 2.3 и 2.4. В таблицах приняты следующие обозначения: $x_{1J}, x_{2J}, x_{3J}, D_J, x_{1N}, x_{2N}, x_{3N}, D_N$ - координаты и дальность до ИРИ, рассчитанные методом минимизации квадратичного функционала и классическим РДМ, $\delta x_{1J}, \delta x_{2J}, \delta x_{3J}, \delta D_J, \delta x_{1N}, \delta x_{2N}, \delta x_{3N}, \delta D_N$ - относительные погрешности вычисления координат и дальности до ИРИ.

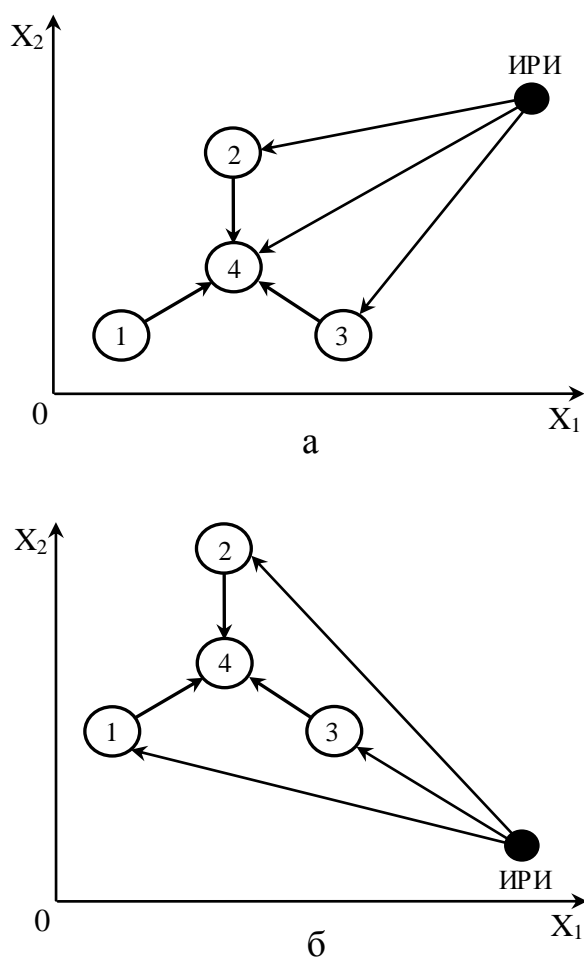


Рис. 2.6 Взаимное расположение станций и ИРИ

Таблица 2.3

Результаты расчетов при поочередном внесении погрешности в одну из станций

<u>Условия вычислительного эксперимента</u>								
Весовой коэффициент i -ой станции: $\rho_i = 0,0000001$								
Истинные координаты ИРИ, км: $x = 100$ $y = 55$ $z = 30$								
Расстояние от начала координат до ИРИ, км: $D = 118.004$								
$\delta\tau_i = 10\%$								
i	$\frac{x_{1J}}{x_{1N}}$	$\frac{x_{2J}}{y_N}$	$\frac{x_{3J}}{x_{3N}}$	$\frac{\delta x_{1J}}{\delta x_{1N}}$	$\frac{\delta x_{2J}}{\delta x_{2N}}$	$\frac{\delta x_{3J}}{\delta x_{3N}}$	$\frac{D_J}{D_N}$	$\frac{\delta D_J}{\delta D_N}$
1	<u>95.475</u> 81.985	<u>52.873</u> 46.533	<u>25.675</u> 7.481	<u>4.525</u> 18.015	<u>3.867</u> 15.395	<u>14.417</u> 75.063	<u>112.117</u> 94.567	<u>4.989</u> 19.862
2	<u>99.509</u> 117.472	<u>54.444</u> 74.756	<u>29.637</u> 41.459	<u>0.491</u> 17.472	<u>1.011</u> 35.92	<u>1.21</u> 38.197	<u>117.237</u> 145.282	<u>0.65</u> 23.117
3	<u>102.158</u> 115.379	<u>54.848</u> 53.919	<u>30.264</u> 30.908	<u>2.158</u> 15.379	<u>0.276</u> 1.965	<u>0.88</u> 3.027	<u>119.835</u> 131.053	<u>1.552</u> 11.058
$\delta\tau_i = 5\%$								
1	<u>95.486</u> 88.937	<u>52.879</u> 49.798	<u>25.686</u> 18.579	<u>4.514</u> 11.063	<u>3.856</u> 9.458	<u>14.38</u> 38.07	<u>112.132</u> 103.609	<u>4.976</u> 12.199
2	<u>99.521</u> 106.858	<u>54.459</u> 62.754	<u>29.647</u> 34.782	<u>0.479</u> 6.858	<u>0.984</u> 14.098	<u>1.177</u> 15.94	<u>117.257</u> 128.711	<u>0.633</u> 9.073
3	<u>101.401</u> 106.817	<u>54.901</u> 54.521	<u>30.176</u> 30.678	<u>1.401</u> 6.817	<u>0.18</u> 0.871	<u>0.587</u> 2.26	<u>119.193</u> 123.788	<u>1.007</u> 4.902
$\delta\tau_i = 1\%$								
1	<u>95.493</u> 97.302	<u>52.882</u> 53.732	<u>25.693</u> 27.461	<u>4.507</u> 2.698	<u>3.851</u> 2.305	<u>14.357</u> 8.463	<u>112.141</u> 114.494	<u>4.969</u> 2.974
2	<u>99.531</u> 101.179	<u>54.47</u> 56.333	<u>29.654</u> 30.858	<u>0.469</u> 1.179	<u>0.964</u> 2.424	<u>1.153</u> 2.859	<u>117.272</u> 119.845	<u>0.62</u> 1.56
3	<u>100.321</u> 101.256	<u>54.977</u> 54.912	<u>30.042</u> 30.159	<u>0.321</u> 1.256	<u>0.042</u> 0.16	<u>0.14</u> 0.53	<u>118.276</u> 119.07	<u>0.231</u> 0.903

В результате проведенного исследования установлено, что порядок величины весового коэффициента ρ_i , при котором получается наилучший результат расчета координат станциями, составляет 10^{-7} , что соответствует порядку погрешности, вносимой в измерение времен задержек прихода сигнала. Кроме того, при больших значениях весового коэффициента результаты вычислений получаются значительно хуже, а уменьшение его ниже величины 10^{-7} выигрыша в точности расчетов не дает. Поэтому в таблице 2.3 приведены результаты расчетов только для этого значения весового

коэффициента.

Из таблицы 2.3 видно, что при погрешности $\delta\tau_1 = 10\%$ рассчитанные координаты и дальность (выделены в таблице) методом минимизации квадратичного функционала значительно ближе к своим истинным значениям в сравнении с расчетом классическим РДМ. В случае, когда $\delta\tau_2$ и $\delta\tau_3$ также поочередно равны 10%, результаты расчетов имеют ту же картину: координаты и дальность, вычисленные при помощи минимизации квадратичного функционала, значительно превосходят по точности расчеты классическим РДМ. Таким образом, с помощью введения весового коэффициента перед соответствующей квадратичной функцией, можно в значительной степени компенсировать погрешность измерения временной задержки прихода сигнала и, в отличие от классического РДМ, получить приемлемые результаты, пригодные для определения местоположения ИРИ.

Расчеты таблицы 2.3 также показывают, что при уменьшении погрешности измерения задержки времени прихода сигнала $\delta\tau_i$, $i = 1..3$ каждой из станций поочередно до 5% метод минимизации квадратичного функционала также имеет преимущество в расчетах по сравнению с классическим РДМ, так как погрешность определения координат и дальности в первом случае значительно ниже.

В случае уменьшения погрешности измерения задержки времени прихода сигнала аналогичным образом до 1% точность расчета методом минимизации квадратичного функционала и классическим РДМ различаются незначительно и, в данном случае, разница использования того или иного метода отсутствует. Для сокращения времени вычисления классический РДМ в этом случае даже более предпочтителен.

Рассмотрим случай одновременного внесения погрешности, равной 10%, в две задержки времени прихода сигнала, например, в τ_1 и τ_2 , и при условии, что ИРИ будет находиться симметрично относительно соответствующих этим задержкам станций, то есть симметричный случай (см. рис. 2.6 б). В результате

проведенного вычислительного эксперимента (таблица 2.3) было установлено, что лучший результат определения координат и дальности также достигается при минимизации функционала. В этом случае весовые коэффициенты ρ_1 и ρ_2 при соответствующих квадратичных функциях также должны иметь порядок 10^{-7} , что соответствует порядку погрешности, вносимой в измерение времен задержек прихода сигнала.

Из таблицы 2.3 также видно, что в случае уменьшения погрешности измерения задержки времени прихода сигнала двумя станциями до 5 %, а затем и до 1 % тенденция изменения результатов расчетов аналогична случаю внесения погрешности измерения только в одну из станций. При 5 % погрешности измерения временной задержки одновременно двумя станциями комплекса метод минимизации квадратичного функционала также имеет преимущество в расчетах по сравнению с классическим РДМ. В случае уменьшения погрешности до 1 % результаты расчетов обоими методами становятся сопоставимыми.

Таблица 2.4

Результаты расчетов при одновременном внесении погрешности в две станции

<u>Условия вычислительного эксперимента</u>								
Весовой коэффициент 1-ой и 2-ой станций: $\rho_1, \rho_2 = 0,0000001$								
Истинные координаты ИРИ, км: $x=96 \ y=25 \ z=8$								
Расстояние от начала координат до ИРИ, км: $D=99.524$								
i	$\frac{x_{1J}}{x_{1N}}$	$\frac{x_{2J}}{y_N}$	$\frac{x_{3J}}{x_{3N}}$	$\frac{\delta x_{1J}}{\delta x_{1N}}$	$\frac{\delta x_{2J}}{\delta x_{2N}}$	$\frac{\delta x_{3J}}{\delta x_{3N}}$	$\frac{D_J}{D_N}$	$\frac{\delta D_J}{\delta D_N}$
$\delta\tau_i = 10\%$								
1,2	<u>93.894</u> 85.736	<u>24.516</u> 31.097	<u>6.327</u> 6.244	<u>2.194</u> 10.692	<u>1.936</u> 24.388	<u>20.913</u> 21.95	<u>97.248</u> 91.415	<u>2.287</u> 8.148
$\delta\tau_i = 5\%$								
1,2	<u>93.893</u> 90.395	<u>24.516</u> 28.369	<u>6.327</u> 8.353	<u>2.195</u> 5.839	<u>1.936</u> 13.476	<u>20.913</u> 4.412	<u>97.247</u> 95.11	<u>2.288</u> 4.436
$\delta\tau_i = 1\%$								
1,2	<u>93.891</u> 94.792	<u>24.517</u> 25.732	<u>6.327</u> 8.324	<u>2.197</u> 1.258	<u>1.932</u> 2.928	<u>20.913</u> 4.05	<u>97.245</u> 98.575	<u>2.29</u> 0.954

Рассмотрено решение задачи определения координат ИРИ разностно-

дальномерным методом в системах пассивной радиолокации на основе экстремальной постановки и выполнен сравнительный анализ точности с классическим методом - решением гиперболической системы уравнений [79]. На основании проведенных вычислительных экспериментов можно сделать вывод о том, что метод минимизации квадратичного функционала является более эффективным инструментом решения задачи определения координат ИРИ разностно-дальномерным методом. Такой подход позволяет учесть погрешность измерения времени задержки прихода сигнала каждой из станций комплекса, что невозможно сделать при классическом решении системы гиперболических уравнений.

Как показывают расчеты, при погрешности измерений времени прихода сигнала 5 % и выше, классический подход дает высокую ошибку расчета координат ИРИ. В противоположность этому, метод минимизации квадратичного функционала позволяет и в этом случае получать приемлемые погрешности расчета координат ИРИ. Эффективное применение метода также возможно и при наличии существенных погрешностей измерения времени прихода сигнала двумя станциями комплекса.

Выводы по второму разделу

1. Разработан метод определения координат ИРИ путем численного решения нелинейной задачи разностно-дальномерной координатометрии, на основе модифицированного метода Ньютона. Использование одной и той же матрицы Якоби для двух-трех шагов итерации позволяет в 2-3 раза сократить время расчета при достаточной точности вычислений.

2. Предложенный метод позволяет строить непрерывные трассы воздушных целей при кратковременной потере излучаемых ими сигналов. Допустимый временной интервал отсутствия сигналов равен 3-5 периодам сканирования антенной системы, установленной на борту цели.

3. Получены зависимости коэффициентов чувствительности от координат воздушных целей и относительной погрешности измерения времени задержки прихода сигнала. Показано, что погрешности измерения координат растут с удалением от места расположения системы пассивной радиолокации.

4. На основе анализа суммарной чувствительности координат ИРИ к ошибке определения времени задержки предложен способ исключения одного из уравнений РДМ, позволяющий сократить объем вычислений и время расчета координат ИРИ при построении трасс воздушных целей путем.

5. Разработан метод определения координат ИРИ путем решения экстремальной задачи по критерию минимума взвешенной суммы квадратов ошибок уравнений разностно-дальномерной кординатометрии.

6. На основании проведенных вычислительных экспериментов можно сделать вывод о том, что метод определения координат ИРИ на основе решения экстремальной задачи является более эффективным инструментом решения задачи определения координат ИРИ, чем метод решения системы уравнений РДКМ при неравноточных измерениях разностей времен задержек прихода сигналов.

7. При одинаковой точности измерений разностей времен задержек прихода сигналов методы определения координат ИРИ на основе решений экстремальной задачи и системы уравнений РДКМ являются эквивалентными.

РАЗДЕЛ 3

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ИРИ В ИНТЕГРИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСАХ РАДИОМОНИТОРИНГА И ИХ АНАЛИЗ

3.1 Разработка метода определения координат ИРИ в интегрированном комплексе «РДС-РВ» и его анализ

3.1.1 Разработка метода определения координат ИРИ в интегрированном комплексе «РДС-РВ» на основе критерия минимума суммы квадратов ошибок

Одним из важных критериев эффективности работы пассивных комплексов контроля радиоэлектронной обстановки, является точность определения координат источников радиоизлучения (ИРИ) [85]. В реальных условиях существенное влияние на точность измерения координат, при работе разностно-дальномерным методом (РДМ), оказывают погрешности измерения времени прихода сигнала на каждой из станций, входящих в состав комплекса.

При этом необходимо отметить, что погрешности измерения обусловлены многими факторами, не всегда поддающимися учёту [86,87].

В настоящее время перспективным направлением повышения эффективности систем противовоздушной обороны (ПВО) является объединение активных и пассивных средств радиолокации в единый комплекс. Совместное использование активных и пассивных средств радиолокации позволяет получить интегрированный комплекс, обладающий информативной избыточностью.

Для оценки влияния информативной избыточности такого комплекса на точность определения координат ИРИ, рассмотрим комплекс, в состав которого входят четыре пространственно-разнесенных станции C , R , L и Q и высотомер V (рис. 3.1).

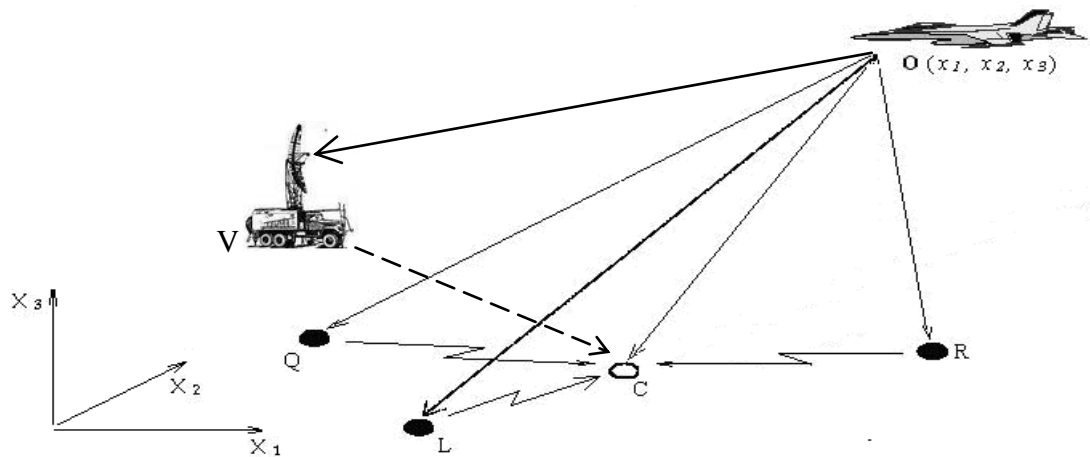


Рис. 3.1. Интегрированная система «РДС-РВ»

Задача разностно-дальномерной координатометрии описывается системой уравнений (2.22). С целью упрощения дальнейших выкладок преобразуем уравнения (2.22) к виду:

$$\begin{aligned}
 F_1 &= \sqrt{(x_1 - x_{1L})^2 + (x_2 - x_{2L})^2 + (x_3 - x_{3L})^2} + D_L - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} - \tau_L \cdot c = 0; \\
 F_2 &= \sqrt{(x_1 - x_{1R})^2 + (x_2 - x_{2R})^2 + (x_3 - x_{3R})^2} + D_R - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} - \tau_R \cdot c = 0; \\
 F_3 &= \sqrt{(x_1 - x_{1Q})^2 + (x_2 - x_{2Q})^2 + (x_3 - x_{3Q})^2} + D_Q - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} - \tau_Q \cdot c = 0.
 \end{aligned} \quad (3.1)$$

Информация о высоте h ИРИ, измеряемой РВ, является избыточной по отношению к РДМ, поэтому стандартная система РДМК (2.22) для четырехпозиционной РДС может быть дополнена следующим избыточным уравнением:

$$x_3 - (h + h_{PB}) = 0 \quad (3.2)$$

где h_{PB} - высота РВ в декартовой системе координат, связанной с РДС.

После дополнения стандартной системы уравнений РДМК (3.1) уравнением (3.2), получаем переопределенную систему уравнений для интегрированного комплекса «РДС-РВ» в виде

$$\begin{aligned}
\varepsilon_1(x_1, x_2, x_3) &= \sqrt{(x_1 - x_{1L})^2 + (x_2 - x_{2L})^2 + (x_3 - x_{3L})^2} + D_L - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} - \tau_L \cdot c = 0; \\
\varepsilon_2(x_1, x_2, x_3) &= \sqrt{(x_1 - x_{1R})^2 + (x_2 - x_{2R})^2 + (x_3 - x_{3R})^2} + D_R - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} - \tau_R \cdot c = 0; \\
\varepsilon_3(x_1, x_2, x_3) &= \sqrt{(x_1 - x_{1Q})^2 + (x_2 - x_{2Q})^2 + (x_3 - x_{3Q})^2} + D_Q - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} - \tau_Q \cdot c = 0; \\
\varepsilon_4(x_3) &= x_3 - (h + h_{PB}) = 0.
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Система уравнений (3.3) содержит 3 неизвестных величины – координаты положения ИРИ x_1, x_2, x_3 , связанные четырьмя уравнениями, то есть является переопределенной и не может быть решена классическими методами решения систем уравнения [61]. В общем случае система (3.3) может не иметь точного решения и ошибки $\varepsilon_i \neq 0, i = 1..4$. В этом случае необходимо найти некоторый "оптимальный" вектор координат $x = (x_1, x_2, x_3)^T$, который обеспечивает минимум некоторой функции ошибок $\varepsilon_i, i = 1..4$ в системе уравнений (3.3).

Решение системы уравнений (3.3) может быть найдено путем нахождения такого вектора значений $x = (x_1, x_2, x_3)^T$, при которых будет достигнут минимум суммы квадратов ошибок $\varepsilon_i, i = 1..4$ уравнений, входящих в систему (3.3). Для поиска минимума необходимо выполнить решение экстремальной задачи.

Примем: $\tau_1 = \tau_L, \tau_2 = \tau_Q, \tau_3 = \tau_R, \bar{\tau} = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]$. Квадратичный функционал, оценивающий величину суммарной ошибки интегрированной системы, состоящей из комплекса пассивной радиолокации и радиовысотомера, можно записать в виде:

$$\begin{aligned}
J(x_1, x_2, x_3) &= \sum_{j=1}^3 \left[\left(\sqrt{(x_1 - x_1^j)^2 + (x_2 - x_2^j)^2 + (x_3 - x_3^j)^2} + D_j - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} - \tau_j \cdot c \right)^2 + \right. \\
&\quad \left. + (x_3 - (h + h_{PB}))^2 \right] \tag{3.4}
\end{aligned}$$

Пользуясь обозначениями системы (3.1), квадратичный функционал (3.4) перепишем в более компактном виде:

$$J(x_1, x_2, x_3) = \sum_{j=1}^3 F_j^2(x_1, x_2, x_3) + (x_3 - (h + h_{PB}))^2 \tag{3.5}$$

Функционал $J(x_1, x_2, x_3)$ состоит из суммы квадратичных функций,

связывающих задержки времени прихода сигнала на станции комплекса пассивной радиолокации с координатами ИРИ, и квадратичной функции, учитывающей данные о координате x_3 (высоте), полученные от радиовысотомера [90].

Сформулируем необходимые условия определения минимума функционала (3.5) в покомпонентном представлении [4]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial J(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_1} &= 0; \\ \frac{\partial J(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_2} &= 0; \\ \frac{\partial J(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_3} &= 0,\end{aligned}\tag{3.6}$$

где

$$\frac{\partial J(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_i} = 2 \left\{ \sum_{j=1}^3 F_j(x_1, x_2, x_3) \cdot \frac{\partial F_j(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_i} \right\} + \frac{\partial (x_3 - (h + h_{PB}))^2}{\partial x_i} = 0, \quad i = 1..3\tag{3.7}$$

при этом

$$\frac{\partial F_j(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_i} = \frac{x_i - x_i^j}{\sqrt{(x_i - x_1^j)^2 + (x_i - x_2^j)^2 + (x_i - x_3^j)^2}} - \frac{x_i}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}}\tag{3.8}$$

3.1.2 Анализ точности определения координат ИРИ при совместной работе интегрированной системы «РДС–РВ»

Для оценки влияния высотомера на систему «РДС-РВ», а именно на вычисляемые значения координат ИРИ, предположим, что комплекс пассивной радиолокации имеет точные значения координат ИРИ, а погрешность измерения имеет только высотомер. Результаты расчетов приведены в таблице 3.1, в которой приняты следующие обозначения: x_1, x_2, x_3, D - координаты и дальность до ИРИ, рассчитанные методом минимизации квадратичного функционала (3.3), $\delta x_1, \delta x_2, \delta x_3, \delta D, \delta x_1, \delta x_2, \delta x_3, \delta D$ - относительные погрешности вычисления координат и дальности до ИРИ, δh - относительная

погрешность высотомера.

Таблица 3.1

**Совместная работа системы пассивной радиолокации и высотомера:
погрешность измерения имеет только высотомер**

<u>Условия вычислительного эксперимента</u>							
Истинные координаты ИРИ, км: $x=100$; $y=55$; $z=8$;							
Расстояние от начала координат до ИРИ, км: $D=114.407$;							
x_1 , км	x_2 , км	x_3 , км	δx_1 , %	δx_2 , %	δx_3 , %	D , км	δD , %
$\delta h = 0,7\%$							
100.048	55.021	8.056	0.048	0.038	0.7	114.463	0.049
$\delta h = 1\%$							
100.068	55.03	8.08	0.068	0.055	1	114.487	0.07
$\delta h = 2\%$							
100.137	55.061	8.159	0.137	0.111	1.988	114.567	0.14

Из таблицы 3.1 видно, что наибольшее влияние погрешность высотомера оказывает на значение координаты x_3 , то есть высоты. Координаты x_1 , x_2 подвержены влиянию незначительно. Ошибка определения дальности возрастает с увеличением погрешности высотомера, однако значения всех погрешностей как по координатам, так и по дальности невелики и находятся в технически допустимых пределах (ниже 4 %).

В целях определения эффективности предлагаемого метода информационной избыточности произведем анализ влияния данных высотомера на повышение точности измерения координат системой пассивной радиолокации и высотомера в случае, когда и система пассивной радиолокации, и высотомер имеют некоторую погрешность измерения времени задержки прихода сигнала на станции комплекса и высоты соответственно. Этот случай максимально соответствует реальной ситуации на практике. Результаты расчетов приведены в таблице 3.2. В ней приняты те же обозначения, что и в таблице 3.1, δh - относительная погрешность высотомера, координаты ИРИ также рассчитываются методом минимизации квадратичного функционала (3.3).

Таблица 3.2

**Совместная работа системы пассивной радиолокации и высотомера:
погрешность измерения имеют как комплекс пассивной радиолокации и
высотомер**

<u>Условия вычислительного эксперимента</u>							
Относительные погрешности измерения времени задержки прихода сигнала станциями: $\delta\tau_1=0,4\%$; $\delta\tau_2=0,6\%$; $\delta\tau_3=0,8\%$;							
Истинные координаты ИРИ, км: $x=100$; $y=55$; $z=8$;							
Расстояние от начала координат до ИРИ, км: $D=114.407$;							
x_1 , км	x_2 , км	x_3 , км	δx_1 , %	δx_2 , %	δx_3 , %	D , км	δD , %
без высотомера (только комплекс пассивной радиолокации)							
100.347	55.113	5.558	0.347	0.205	30.525	114.62	0.187
$\delta h = 0,7\%$							
102.303	55.972	8.049	2.303	1.767	0.612	116.891	2.171
$\delta h = 1\%$							
102.325	55.981	8.073	2.325	1.784	0.913	116.916	2.193
$\delta h = 2\%$							
102.398	56.014	8.153	2.398	1.844	1.913	117.002	2.268

На основе данных таблицы 3.2 можно сделать вывод о том, что комплекс пассивной радиолокации является крайне чувствительной системой в отношении точности измерения времен задержек прихода сигнала на станции – даже относительно небольшие погрешности измерения приводят к значительным погрешностям измерения координат ИРИ. Это, как видно из таблицы, особенно касается высоты ИРИ. Координаты x_1 , x_2 довольно слабо отклоняются от своих истинных значений, однако их изменения также заметны. Работа комплекса пассивной радиолокации без высотомера показывает, что погрешности измерения времени задержки прихода сигнала в пределах 1 % могут приводить к погрешности измерения координаты x_3 ИРИ до 30,5 %.

Напротив, работа комплекса совместно с высотомером в значительной степени компенсирует столь высокую погрешность измерения высоты - при погрешности высотомера равной 2%, погрешность измерения высоты системой «комплекс пассивной радиолокации - высотомер» составляет всего 1,85%. Погрешности определения координат x_1 , x_2 , а также дальности до ИРИ D , как видно из таблицы 3.2, невелики и находятся в допустимых пределах.

Как видно, в отличие от классического решения системы гиперболических уравнений РДМ, экстремальная постановка этого метода позволяет учесть погрешность измерения времени задержки прихода сигнала на каждую из станций и, как следствие, анализировать влияние этой погрешности на точность вычисления координат ИРИ комплексом пассивного радиомониторинга.

Экстремальная постановка РДМ позволяет решать переопределенную систему уравнений, то есть систему, учитывающую возможную информационную избыточность измерений одной или нескольких координат;

Рассмотрим также работу РДС и системы «РДС - РВ» на основе статистической модели, структурная схема которой представлена на рис. 3.2. В обоих этих случаях, определение координат будем производить на основе поиска минимума квадратичного функционала (3.3) с использованием метода

статистических испытаний Монте-Карло [5].

Схема рис. 3.2 показывает, что статистические характеристики: математическое ожидание ($m_{x_1}, m_{x_2}, m_{x_3}, m_D$) для каждой из координат и дальности, дисперсия ($d_{x_1}, d_{x_2}, d_{x_3}, d_D$), СКО ($\sigma_{x_1}, \sigma_{x_2}, \sigma_{x_3}, \sigma_D$), асимметрия ($s_{x_1}, s_{x_2}, s_{x_3}, s_D$) и эксцесс ($\gamma_{x_1}, \gamma_{x_2}, \gamma_{x_3}, \gamma_D$) формируются из выборки координат, получаемых, в свою очередь, в результате минимизации квадратичного функционала. Входными данными функционала являются случайные значения времен задержек прихода сигнала на станции комплекса, а также данные высотомера, распределенные по нормальному закону [6].



Рис. 3.2. Функциональная схема статистического моделирования вычисления координат ИРИ методом Монте-Карло

Результаты моделирования представлены на рисунках 3.3, 3.4, а условия соответствующих вычислительных экспериментов и полученные статистические результаты приведены в таблице 3.3.

По результатам статистического моделирования можно сделать следующие выводы:

При совместной работе комплекса пассивного радиомониторинга и высотомера эллипс ошибок в координатах (X_1, X_2) значительно уменьшается (рис. 3.4), а эллипсы ошибок в координатах (X_1, X_3) и (X_2, X_3) не только уменьшаются, но и изменяют своё положение с наклонного на горизонтальное (рис. 3.4), что в сильной степени повышает точность определение высоты радиолокационной системой также и вследствие того, что направление малой

оси эллипса ошибок в этом случае совпадает с осью X_3 .

При работе системы «комплекс пассивной радиолокации - высотомер» СКО координат x_1 и x_2 уменьшается практически в два раза, СКО координаты x_3 уменьшается на два порядка, СКО расстояния D от ИРИ начала координат также уменьшается в два раза. Эта закономерность, как видно из таблицы, сохраняется даже в том случае, когда СКО ошибки высотомера ($\sigma_h = 0,3\%$) больше СКО ошибки определения времени задержки прихода сигнала каждой из станций.

Таблица 3.3

Результаты статистического моделирования

Условия вычислительного эксперимента:						
Истинные координаты ИРИ, км: $x = 100$; $y = 55$; $z = 8$;						
Расстояние от начала координат до ИРИ, км: $D = 114.407$;						
Количество точек для моделирования, $N = 2000$;						
СКО ошибки определения времени задержки прихода сигнала, %:						
1-ой станции, $\sigma_1 = 0,15$; 2-ой станции, $\sigma_2 = 0,2$; 3-ей станции, $\sigma_3 = 0,25$;						
СКО ошибки высотомера, %	Координата, дальность, км	СКО координаты (дальности), км	Математическое ожидание, км	Дисперсия, км ²	Асимметрия	Эксцесс
- (без высотомера)	x_1	0.924	99.997	0.854	-0.858	3.282
	x_2	0.434	54.995	0.188	-0.482	1.596
	x_3	1.18	7.881	1.398	-3.491	21.41
	D	1.056	114.4	0.844	-0.844	3.212
$\sigma_h = 0,1$	x_1	0.497	100.0	0.247	0.114	0.101
	x_2	0.221	55.008	0.049	0.098	0.172
	x_3	$8.756 \cdot 10^{-3}$	8.0	$7.67 \cdot 10^{-5}$	-0.046	0.15
	D	0.509	114.4	0.259	0.118	0.16
$\sigma_h = 0,2$	x_1	0.497	99.998	0.247	0.113	0.096
	x_2	0.221	55.008	0.049	0.095	0.155
	x_3	0.017	7.999	$2.723 \cdot 10^{-4}$	-0.013	-0.068
	D	0.509	114.41	0.259	0.116	0.15
$\sigma_h = 0,3$	x_1	0.498	99.998	0.248	0.113	0.108
	x_2	0.221	55.008	0.049	0.101	0.175
	x_3	0.024	7.999	$5.723 \cdot 10^{-4}$	0.017	-0.101
	D	0.51	114.41	0.26	0.118	0.169

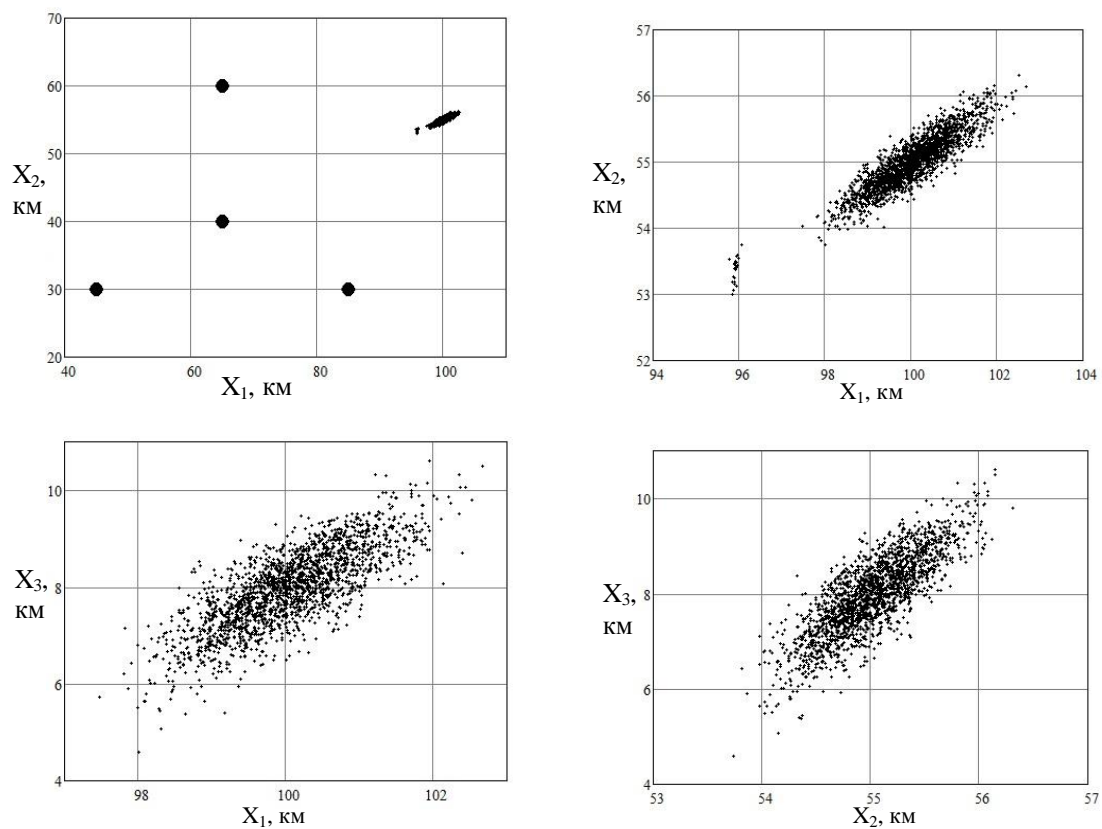


Рис. 3.3 Эллипс ошибок комплекса пассивной радиолокации

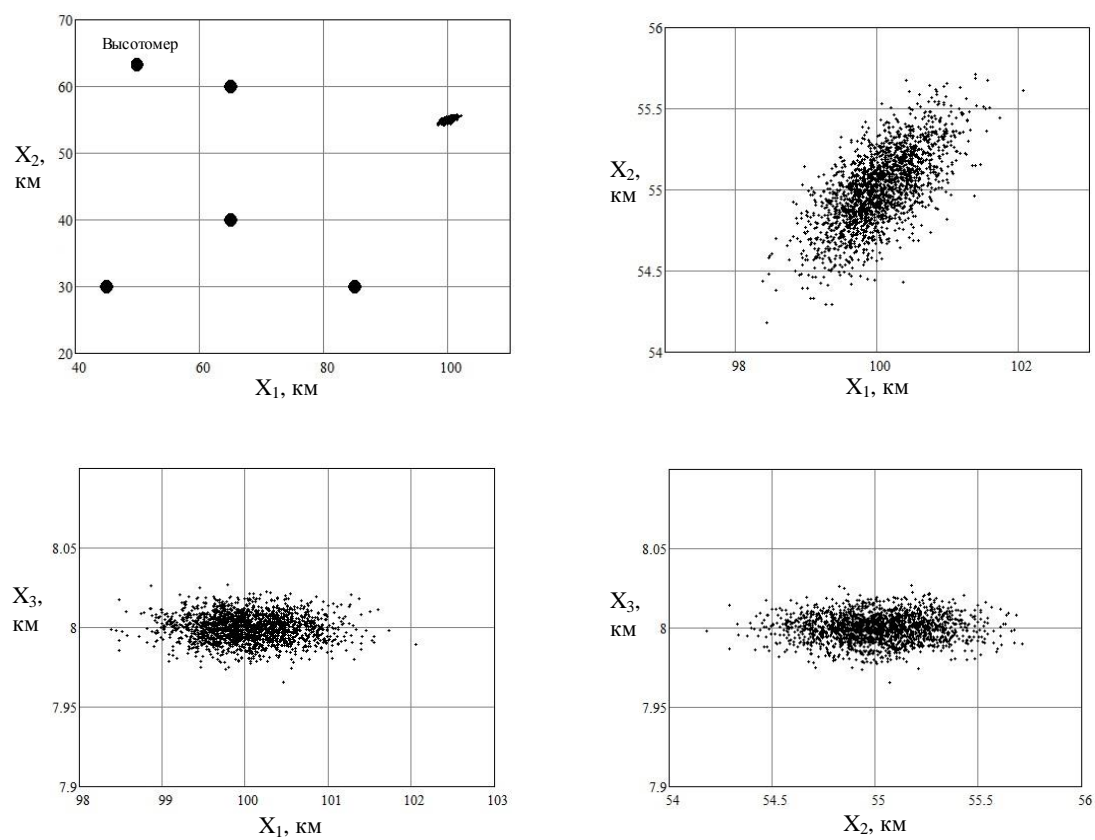


Рис. 3.4 Эллипс ошибок комплекса пассивной радиолокации при совместной работе с высотомером ($\sigma_h = 0,1\%$)

Значения математического ожидания остаются в тех же пределах, то есть средние значения вычисляемых координат, и дальности до ИРИ остаются неизменными.

Дисперсия по координате x_1 уменьшается в 3,5 раза, по координатам x_2 и x_3 – в 3,8 и 4500 раз соответственно. Асимметрия и эксцесс уменьшаются практически на порядок.

Таким образом, интеграция активных и пассивных систем радиолокации позволяет существенно снизить погрешность измерения координат ИРИ и тем самым повысить эффективности систем ПВО в целом.

3.2 Разработка метода определения координат ИРИ в интегрированном комплексе «РДС - РЛС» и его анализ

3.2.1 Разработка метода определения координат ИРИ в интегрированном комплексе «РДС-РЛС» на основе критерия минимума суммы квадратов ошибок

Для оценки влияния информативной избыточности комплекса «РДС-РЛС» на точность определения координат ИРИ, рассмотрим комплекс, в состав которого входят четыре пространственно-разнесенных станции C , R , L и Q , и активная радиолокационная станция S (рис. 3.5). Задача разностно-дальномерной координатометрии описывается системой уравнений (3.1).

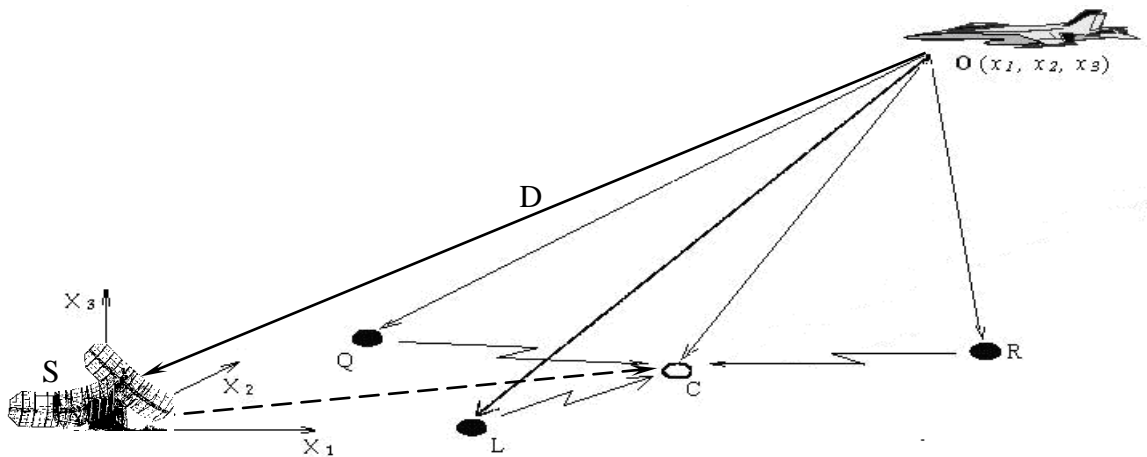


Рис. 3.5. Система «РДС - РЛС»

Будем полагать, что РЛС измеряет дальность D , азимут β и угол места α ИРИ рис.3.6. Координаты ИРИ в декартовой системе координат, связанной с РЛС, определяются по формулам

$$x_1^* = D \cos \alpha \sin \beta;$$

$$x_2^* = D \cos \alpha \cos \beta;$$

$$x_3^* = D \sin \alpha.$$

При условии, что системы координат РДС и РЛС связаны матричным преобразованием Γ , вектор координат ИРИ, полученный по данным РЛС, в системе координат РДС определяется по формуле

$$\tilde{\mathbf{x}} = \Gamma \mathbf{x}^*. \quad (3.9)$$

где $\mathbf{x}^* = (x_1^*, x_2^*, x_3^*)^T$ - вектор координат ИРИ, полученный по данным РЛС, в декартовой системе координат, связанной с РЛС; $\tilde{\mathbf{x}} = (\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3)^T$ - вектор координат ИРИ, полученный по данным РЛС, в декартовой системе координат, связанной с РДС.

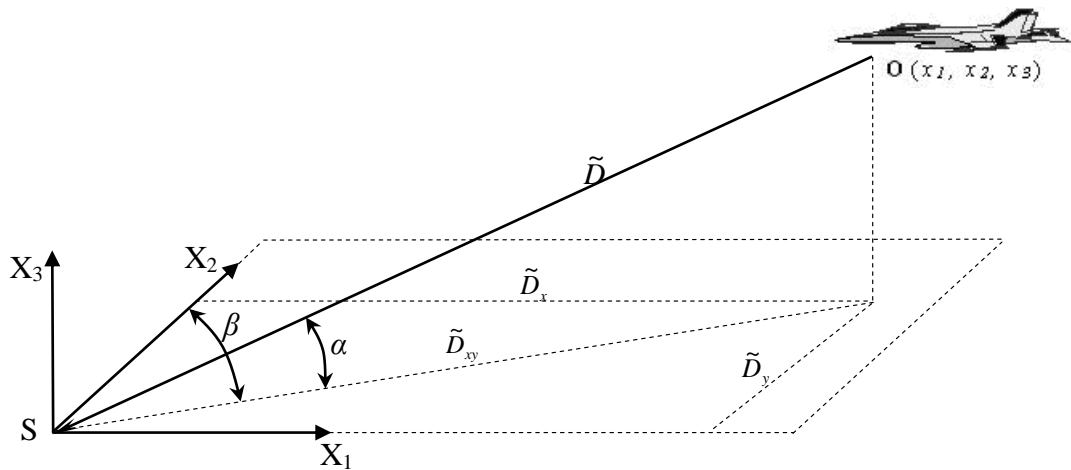


Рис. 3.6 Расположение ИРИ и активной РЛС в декартовой системе координат, связанной с РЛС

Информация о координатах ИРИ $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3$, полученных по данным РЛС, является избыточной по отношению к РДМ, поэтому стандартная система РДМК (2.22) для четырехпозиционной РДС может быть дополнена следующими избыточными уравнениями:

$$\begin{aligned} D_1 &= x_1 - \tilde{x}_1; \\ D_2 &= x_2 - \tilde{x}_2; \\ D_3 &= x_3 - \tilde{x}_3. \end{aligned} \quad (3.10)$$

После дополнения стандартной системы уравнений РДМК (3.1) уравнениями (3.2), получаем переопределенную систему уравнений для интегрированного комплекса «РДС-РЛС» в виде

$$\begin{aligned} \varepsilon_1(x_1, x_2, x_3) &= \sqrt{(x_1 - x_{1L})^2 + (x_2 - x_{2L})^2 + (x_3 - x_{3L})^2} + D_L - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} - \tau_L \cdot c = 0; \\ \varepsilon_2(x_1, x_2, x_3) &= \sqrt{(x_1 - x_{1R})^2 + (x_2 - x_{2R})^2 + (x_3 - x_{3R})^2} + D_R - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} - \tau_R \cdot c = 0; \\ \varepsilon_3(x_1, x_2, x_3) &= \sqrt{(x_1 - x_{1Q})^2 + (x_2 - x_{2Q})^2 + (x_3 - x_{3Q})^2} + D_Q - \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} - \tau_Q \cdot c = 0; \\ \varepsilon_4(x_1) &= x_1 - \tilde{x}_1 = 0; \\ \varepsilon_5(x_2) &= x_2 - \tilde{x}_2 = 0; \\ \varepsilon_6(x_3) &= x_3 - \tilde{x}_3 = 0. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Система уравнений (3.11) содержит 3 неизвестных величины – координаты положения ИРИ x_1, x_2, x_3 , связанные шестью уравнениями, то есть

является переопределенной и не может быть решена классическими методами решения систем уравнения [61 Пс.83]. В общем случае система (3.11) не имеет точного решения и ошибки $\varepsilon_i \neq 0, i = 1..6$.

Решение системы уравнений (3.11) может быть найдено путем нахождения такого вектора значений $x = (x_1, x_2, x_3)^T$, при которых будет достигнут минимум суммы квадратов ошибок $\varepsilon_i, i = 1..6$ уравнений, входящих в систему (3.11). Для поиска минимума необходимо выполнить решение экстремальной задачи.

Квадратичный функционал, оценивающий величину суммарной ошибки системы, состоящей из комплекса пассивной радиолокации и активной РЛС, можно записать в виде:

$$J(x_1, x_2, x_3) = \sum_{j=1}^3 F_j^2(x_1, x_2, x_3) + D_j^2(x_j). \quad (3.12)$$

Функционал $J(x_1, x_2, x_3)$ состоит из суммы квадратичных функций $F_j^2(x_1, x_2, x_3)$, связывающих задержки времени прихода сигнала на станции комплекса пассивной радиолокации с координатами ИРИ, и квадратичных функций $D_j^2(x_j)$, учитывающих данные о координатах ИРИ, полученные от активной РЛС [97,98].

Сформулируем необходимые условия определения минимума функционала (3.7) в покомпонентном представлении [4]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial J(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_1} &= 0 \\ \frac{\partial J(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_2} &= 0 \\ \frac{\partial J(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_3} &= 0 \end{aligned} \quad (3.13)$$

где

$$\frac{\partial J(\mathbf{x})}{\partial x_i} = 2 \left\{ \sum_{j=1}^3 F_j(\mathbf{x}) \cdot \frac{\partial F_j(\mathbf{x})}{\partial x_i} \right\} + \frac{\partial D_1^2(x_1)}{\partial x_i} + \frac{\partial D_2^2(x_2)}{\partial x_i} + \frac{\partial D_3^2(x_3)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.14)$$

при этом

$$\frac{\partial F_j(\mathbf{x})}{\partial x_i} = \frac{x_i - x_i^j}{\sqrt{(x_i - x_1^j)^2 + (x_i - x_2^j)^2 + (x_i - x_3^j)^2}} - \frac{x_i}{\sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}} \quad i=1..3 \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial D_i^2(x_i)}{\partial x_i} = 2(x_i - \tilde{x}_i) \quad (3.16)$$

3.2.2 Анализ точности определения координат ИРИ при совместной работе интегрированной системы «РДС–РЛС»

В целях определения эффективности предлагаемого метода информационной избыточности произведем анализ влияния данных активной РЛС на повышение точности измерения координат системой «комплекс пассивной радиолокации – активная РЛС» в случае, когда система пассивной радиолокации и активная РЛС имеют некоторую погрешность измерения времени задержки прихода сигнала на станции комплекса и координат $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3$ соответственно [99,100]. Этот случай максимально соответствует реальной ситуации на практике. Результаты расчетов приведены в таблице 1, в которой приняты следующие обозначения: x_1, x_2, x_3, D - координаты и дальность до ИРИ, рассчитанные методом минимизации квадратичного функционала (3.8), $\delta x_1, \delta x_2, \delta x_3, \delta D, \delta \tilde{x}_1, \delta \tilde{x}_2, \delta \tilde{x}_3, \delta D$ - относительные погрешности вычисления координат и дальности до ИРИ, $\delta \tilde{x}_1, \delta \tilde{x}_2, \delta \tilde{x}_3$ - относительные погрешности активной РЛС.

Таблица 3.4

**Совместная работа системы пассивной радиолокации и активной РЛС:
погрешность измерения имеют как комплекс пассивной радиолокации,
так и активная РЛС**

<u>Условия вычислительного эксперимента</u>							
Относительные погрешности измерения времени задержки прихода сигнала станциями: $\delta\tau_1=0,5\%$; $\delta\tau_2=3\%$; $\delta\tau_3=2\%$; Истинные координаты ИРИ, км: $x=100$; $y=55$; $z=8$; Расстояние от начала координат до ИРИ, км: $D=114.407$;							
x_1 , км	x_2 , км	x_3 , км	δx_1 , %	δx_2 , %	δx_3 , %	D , км	δD , %
без активной РЛС (только комплекс пассивной радиолокации)							
107.038	59.06	6.219	7.038	7.382	22.262	122.409	6.994
$\tilde{\delta x}_1 = 0,04\%$			$\tilde{\delta x}_2 = 0,04\%$		$\tilde{\delta x}_3 = 0,04\%$		
100.345	55.478	7.579	0.345	0.869	5.263	114.91	0.44
$\tilde{\delta x}_1 = 0,4\%$			$\tilde{\delta x}_2 = 0,4\%$		$\tilde{\delta x}_3 = 0,4\%$		
100.683	55.652	7.629	0.683	1.185	4.638	115.293	0.774
$\tilde{\delta x}_1 = 1,4\%$			$\tilde{\delta x}_2 = 1,4\%$		$\tilde{\delta x}_3 = 1,4\%$		
101.627	56.137	7.767	1.627	2.067	2.912	116.36	1.707
$\tilde{\delta x}_1 = 2,4\%$			$\tilde{\delta x}_2 = 2,4\%$		$\tilde{\delta x}_3 = 2,4\%$		
102.58	56.628	7.9	2.58	2.96	1.25	117.438	2.65

На основе данных таблицы 3.4 можно сделать вывод о том, что комплекс пассивной радиолокации является крайне чувствительной системой в отношении точности измерения времен задержек прихода сигнала на станции – даже относительно небольшие погрешности измерения приводят к значительным погрешностям измерения координат ИРИ. Это, как видно из таблицы, особенно касается высоты ИРИ. Координаты x_1 , x_2 отклоняются от своих истинных значений в меньшей степени, однако их изменения также существенны и находятся в пределах 7 %. Работа комплекса пассивной радиолокации без активной РЛС показывает, что погрешности измерения времени задержки прихода сигнала в пределах 2 % могут приводить к недопустимым погрешностям измерения координаты x_3 ИРИ.

Работа комплекса совместно с активной РЛС в значительной степени компенсирует столь высокую погрешность измерения высоты - при погрешности активной РЛС по координате x_3 равной 2,4 %, погрешность

измерения высоты системой «комплекс пассивной радиолокации – активная РЛС» составляет 1,25 %. Погрешности определения координат x_1 , x_2 , а также дальности до ИРИ D , как видно из таблицы 2, невелики и находятся в допустимых пределах (меньше 4 %).

Как видно, в отличие от классического решения системы гиперболических уравнений РДМ, экстремальная постановка этого метода позволяет учесть погрешность измерения времени задержки прихода сигнала на каждую из станций и, как следствие, анализировать влияние этой погрешности на точность вычисления координат ИРИ комплексом пассивного радиомониторинга.

Экстремальная постановка РДМ позволяет решать переопределенную систему уравнений, то есть систему, учитывающую возможную информационную избыточность измерений одной или нескольких координат;

Для случая массовых вычислений, то есть реальных условий работы радиолокационных комплексов, рассмотрим работу комплекса пассивной радиолокации и системы «РДС - РЛС» на основе статистической модели, структурная схема которой представлена на рис. 3.7. В обоих этих случаях определение координат будем производить на основе поиска минимума квадратичного функционала (3.7) и с использованием метода статистических испытаний Монте-Карло [5].

Схема рис. 3.7 показывает, что статистические характеристики: математическое ожидание ($m_{x_1}, m_{x_2}, m_{x_3}, m_D$) для каждой из координат и дальности, дисперсия ($d_{x_1}, d_{x_2}, d_{x_3}, d_D$), СКО ($\sigma_{x_1}, \sigma_{x_2}, \sigma_{x_3}, \sigma_D$), асимметрия ($s_{x_1}, s_{x_2}, s_{x_3}, s_D$) и эксцесс ($\gamma_{x_1}, \gamma_{x_2}, \gamma_{x_3}, \gamma_D$) формируются из выборки координат, получаемых, в свою очередь, в результате минимизации квадратичного функционала. Входными данными функционала являются случайные значения времен задержек прихода сигнала на станции комплекса, а также данные активной РЛС, распределенные по нормальному закону



Рисунок 3.7 Функциональная схема статистического моделирования вычисления координат ИРИ методом Монте-Карло

Результаты моделирования представлены на рисунках 3.8 и 3.9, а условия соответствующих вычислительных экспериментов и полученные статистические результаты приведены в таблице 3.5.

По результатам статистического моделирования можно сделать следующие выводы:

При совместной работе комплекса пассивного радиомониторинга и активной РЛС эллипс ошибок в координатах (X_1, X_2) значительно уменьшается, причем его полуоси становятся практически равными (рис. 3.9), то есть эллипс ошибок вырождается в окружность.

Эллипсы ошибок в координатах (X_1, X_3) и (X_2, X_3) не только уменьшаются, но и изменяют своё положение с наклонного на горизонтальное (рис. 3.9) и полуоси их также становятся примерно одинаковыми, что в сильной степени повышает точность определение высоты радиолокационной системой в том числе и из-за того, что направление малой оси эллипса ошибок в этом случае совпадает с осью X_3 .

При работе системы «комплекс пассивной радиолокации – активная РЛС» когда $\sigma_{\tilde{x}_1}, \sigma_{\tilde{x}_2}, \sigma_{\tilde{x}_3} \leq 0,2$, СКО координат x_1 и x_2 уменьшается практически на порядок, СКО координаты x_3 уменьшается примерно на два порядка, СКО расстояния D от ИРИ начала координат также уменьшается практически на два порядка.

Как видно из таблицы, при $0,2 \leq \sigma_{\tilde{x}_1}, \sigma_{\tilde{x}_2}, \sigma_{\tilde{x}_3} \leq 0,3$, то есть когда СКО ошибки активной РЛС в пределах или превышает СКО ошибки определения времени задержки прихода сигнала каждой из станций СКО координат x_1 и x_2 уменьшается в 4 раза, СКО координаты x_3 уменьшается на два порядка, а СКО расстояния D от ИРИ начала координат также уменьшается примерно в 4 раза.

Таблица 3.5

Результаты статистического моделирования

Условия вычислительного эксперимента:						
Истинные координаты ИРИ, км: $x = 100$; $y = 55$; $z = 8$;						
Расстояние от начала координат до ИРИ, км: $D = 114.407$;						
Количество статистических испытаний, $N = 2000$;						
СКО ошибки определения времени задержки прихода сигнала, %:						
1-ой станции, $\sigma_1 = 0,15$; 2-ой станции, $\sigma_2 = 0,2$; 3-ей станции, $\sigma_3 = 0,25$;						
СКО ошибки активной РЛС, % ($\sigma_{\tilde{x}_1}, \sigma_{\tilde{x}_2}, \sigma_{\tilde{x}_3}$)	Координата, дальность, км	Математическое ожидание, км	СКО координаты (дальности), км	Дисперсия, км ²	Асимметрия	Эксцесс
(без активной РЛС)	x_1	99.997	0.924	0.854	-0.858	3.282
	x_2	54.995	0.434	0.188	-0.482	1.596
	x_3	7.881	1.18	1.398	-3.491	21.41
	D	114.4	1.056	0.844	-0.844	3.212
0,01	x_1	100.0	0.044	$1.959 \cdot 10^{-3}$	$-4.975 \cdot 10^{-3}$	0.17
	x_2	55.0	0.055	$3.07 \cdot 10^{-3}$	-0.121	0.069
	x_3	8.0	0.031	$9.432 \cdot 10^{-4}$	$-7.936 \cdot 10^{-3}$	0.085
	D	114.41	0.031	$9.426 \cdot 10^{-4}$	$-5.375 \cdot 10^{-3}$	0.146
0,1	x_1	100.0	0.099	$9.895 \cdot 10^{-3}$	-0.052	-0.089
	x_2	55.0	0.067	$4.482 \cdot 10^{-3}$	-0.018	0.097
	x_3	8.0	0.032	$1.022 \cdot 10^{-3}$	-0.083	0.08
	D	114.41	0.092	$8.452 \cdot 10^{-3}$	-0.026	-0.154
0,2	x_1	100.0	0.179	0.032	0.018	0.024
	x_2	55.0	0.098	$9.575 \cdot 10^{-3}$	-0.046	-0.24
	x_3	8.0	0.036	$1.282 \cdot 10^{-3}$	0.031	0.135
	D	114.4	0.173	0.03	0.026	0.053
0,3	x_1	100.0	0.269	0.073	-0.01	-0.102
	x_2	55.0	0.129	0.017	$-5.438 \cdot 10^{-3}$	0.046
	x_3	8.0	0.042	$1.736 \cdot 10^{-3}$	0.023	-0.043
	D	114.4	0.261	0.068	-0.017	-0.102

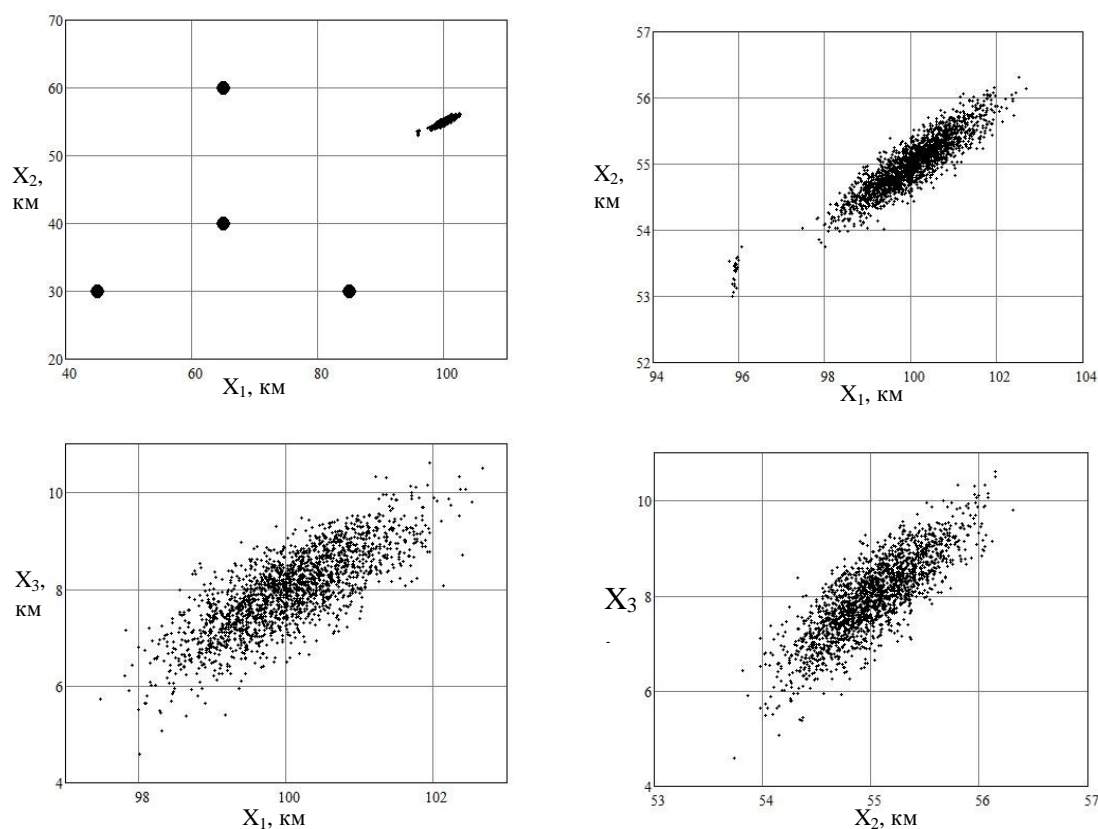


Рис. 3.8 Эллипс ошибок комплекса пассивной радиолокации

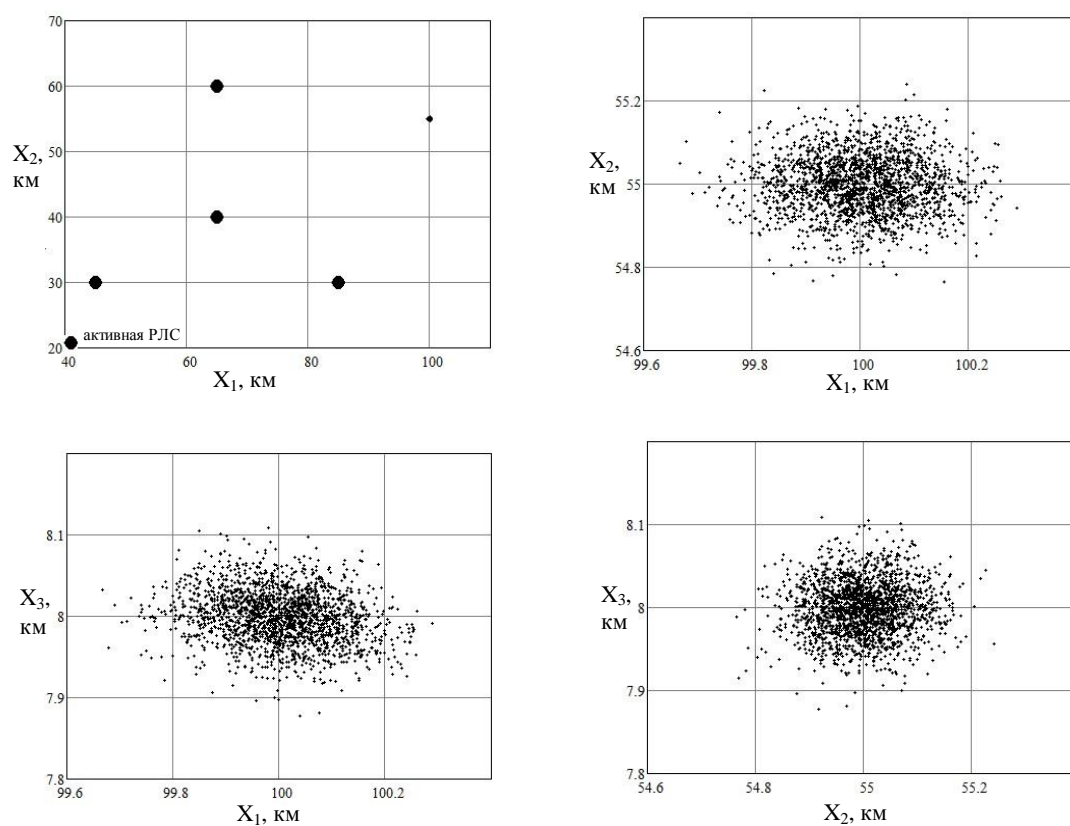


Рис. 3.9. Эллипс ошибок комплекса пассивной радиолокации при совместной работе с активной РЛС ($\sigma_{\bar{x}_1}, \sigma_{\bar{x}_2}, \sigma_{\bar{x}_3} = 0,1 \%$)

Значения математического ожидания остаются в тех же пределах, то есть средние значения вычисляемых координат, и дальности до ИРИ остаются неизменными.

Дисперсия по координатам x_1 , x_2 , дальности D уменьшается, в зависимости от СКО координат ИРИ, получаемых от активной РЛС, на 1-2 порядка. По координате x_3 – на 3 порядка соответственно.

Асимметрия и эксцесс также уменьшаются практически на 1-2 порядка, то есть отклонение от нормального закона распределения становятся значительно меньше.

Все рассчитанные статистические характеристики указывают на то, что интеграция активных и пассивных систем радиолокации позволяет существенно снизить погрешность измерения координат ИРИ и тем самым повысить эффективности систем радиомониторинга в целом.

Выводы по третьему разделу

1. Обосновано создание автоматизированной комплексной информационной системы на основе комплексирования каналов активных и пассивных средств радиолокации.
2. Показано появление новых системных эффектов в системе, включающей в себя активные и пассивные средства радиомониторинга, что позволяет обеспечить помехоустойчивость, увеличить точность определения координат ИРИ, уменьшить временные затраты на наведение средств стрельбы в условиях постановки активных помех.
3. Рассмотрена работа комплекса пассивной радиолокации и системы «РДС - РВ» на основе модели, в которой определение координат производится на основе поиска минимума квадратичного функционала с использованием метода статистических испытаний Монте-Карло.

4. Показано, что интеграция комплекса пассивного радиомониторинга и высотомера позволяет существенно снизить погрешность определения не только высоты ИРИ, но и, вместе с тем, двух других координат.
5. Проведено исследование работы комплекса пассивной радиолокации и системы «РДС - РЛС» с привлечением метода статистических испытаний Монте-Карло на основе поиска минимума квадратичного функционала.
6. Показано, что интеграция комплекса пассивного радиомониторинга и активной РЛС позволяет существенно снизить погрешность определения всех координат ИРИ.

РАЗДЕЛ 4

РЕАЛИЗАЦИЯ И ВНЕДРЕНИЕ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ИНТЕГРИРОВАННЫМИ МНОГОПОЗИЦИОННЫМИ КОМПЛЕКСАМИ РАДИОМОНИТОРИНГА

4.1 Общие вопросы функционирования программного обеспечения КПРМ

Система управления многопозиционного пассивного комплекса базируется на взаимодействии аппаратных и программных средств. Аппаратные средства осуществляет физический прием излученного сигнала, предварительную фильтрацию и обработку [101,102]. К аппаратному обеспечению относятся принимающие антенны, блоки цифровой обработки сигналов, блоки преобразования частоты, внешние устройства (embedded systems) и прочее. Структурная схема аппаратного обеспечения КПРМ представлена на рис. 4.1 [103].

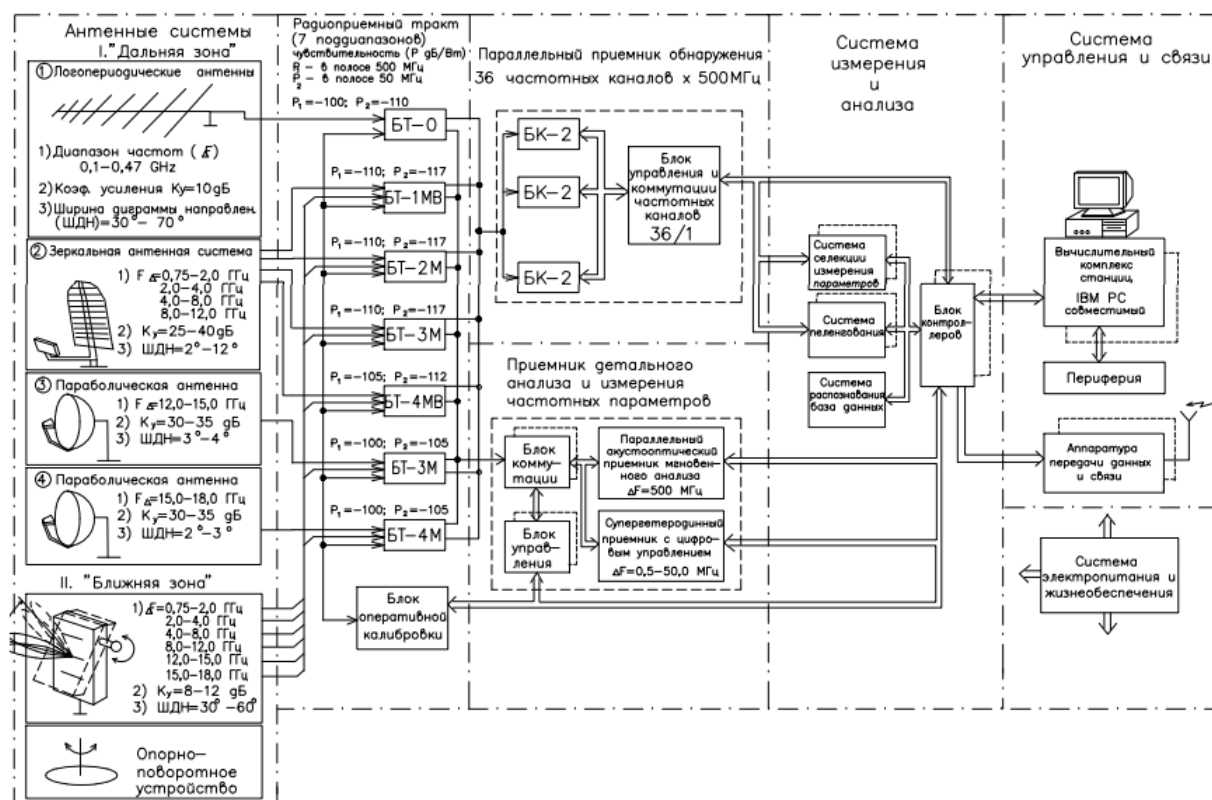


Рис. 4.1. Структурная схема аппаратной части КПРМ

При описании организации информационных потоков, важно отметить, что в роли основного обработчика информации выступает центральная станция, куда передаются данные из боковых станций. С точки зрения аппаратного обеспечения, центральная и боковые станции идентичны. Однако схемы информационных потоков в боковой и центральной станции отличаются [104].

Схема информационных потоков в боковых станциях комплекса представлена на рисунке 4.2:



Рис. 4.2. Схема информационных потоков в боковых станциях комплекса

Боковые станции осуществляют пеленгацию сигнала от источника излучения и осуществляют предварительную обработку сигнала. Обработка сигнала заключается в фильтрации, проверке уровня сигнал/шум и прочее [105]. После этого происходит передача информации по линиям радиорелейной связи на центральную станцию комплекса.

Схема информационных потоков в центральной станции комплекса представлена на рис. 4.3:

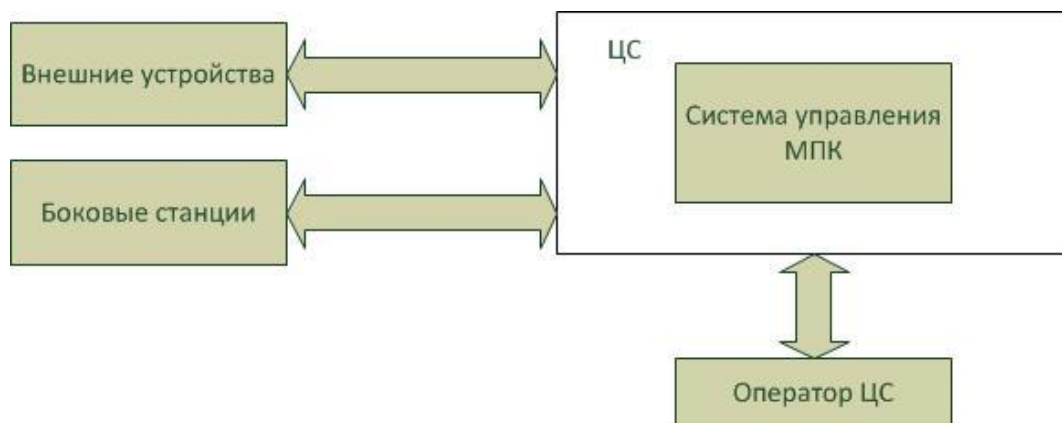


Рис. 4.3. Схема информационных потоков в центральной станции комплекса

При облучении от ИРИ выполняется прием сигнала станциями комплекса. Основная обработка принятого излучения осуществляется в центральной станции (ЦС) [106,107]. ЦС осуществляет связь со всеми боковыми станциями (БС) для координации работы, постановки задач, получения и передачи информации. Оператор ЦС осуществляет управление комплексом и, при необходимости, может напрямую осуществлять управление БС.

На ЦС выполняется основная обработка сигнала, заключающаяся в разделении сигналов от различных ИРИ, классификации сигналов, определении ИП, формировании линий (поверхностей) положения с последующим вычислением координат ИРИ, определении типа цели с использованием БД известных РЛС [108].

Оператор ЦС несет ответственность за общее управление станциями комплекса и работает с большими массивами информации. Как уже было указано ранее, КПРМ осуществляют контроль радиоэлектронного пространства в режиме реального времени, что помимо специфических требований к аппаратуре и методам обработки данных, накладывает также дополнительные требования на скорость принятия решений оператором при выполнении боевых задач [109]. В силу специфики своей работы, КПРМ необходимо осуществлять определение большого массива информации, который должен быть

представлен в компактном и удобном для понимания виде. Для отображения информации о ИРИ и текущих режимах работы пассивного комплекса используются экранные таблицы и графики, представляющие в наглядном виде информационные структуры данных [110].

В центральной станции выполняются следующие основные задачи ИС КПРМ:

- обнаружение, анализ, классификация следующих сигналов, в диапазоне 130 – 18000 МГц:

- а) однопериодных, многопериодных, вобулирующих сигналов с интервалами между импульсами от 1 до 99999 мкс;

- б) непрерывных сигналов;

- пеленгация радиосигналов в ручном и автоматическом режимах;

- отображение состояния ИРИ в рабочем диапазоне частот;

- селекция по частотам обнаруженных ИРИ;

- сохранение результатов работы за длительный временной период;

- отображение результатов обнаружения;

- сопровождение ИРИ;

- выявление, сохранение, идентификацию временных структур ИРИ;

- тестирование работоспособности программно-доступной аппаратуры

ПС;

- управление помеховыми селекторами, селекторами сопровождения для обеспечения отстройки от помеховых сигналов и качественного определения частотных характеристик ИРИ;

- определения координат ИРИ.

В результате обработки принятого сигнала, ИС комплекса обеспечивает выдачу информации о следующих параметрах ИРИ [111]:

- периоды следования импульсов ИРИ;

- класс ИРИ (однопериодный, многопериодный, вобулирующий, непрерывный);

- длительности импульсов ИРИ;

- частоты ИРИ;
- ширина спектра ИРИ;
- период возбуждения;
- типы РЛС сходные по параметрам.

Архитектура системы управления КПРМ представлена на рис. 4.4 [112].

Подсистема взаимодействия с внешними системами ответственна за получение информации от внешних устройств. Основными задачами данной подсистемы являются [113]:

- настройка и контроль состояния портов входа-выхода (I/O ports);
- обеспечение требуемого интерфейса для приема-передачи данных от различных внешних устройств;
- обработка сигналов (callbacks) от внешних устройств (в том числе, real-time сигналов);
- опрос внешних устройств по требованию ИС КПРМ;
- контроль состояния внешних устройств;
- контроль соединения с боковыми станциями комплекса, осуществление передачи данных от/к боковым станциям.

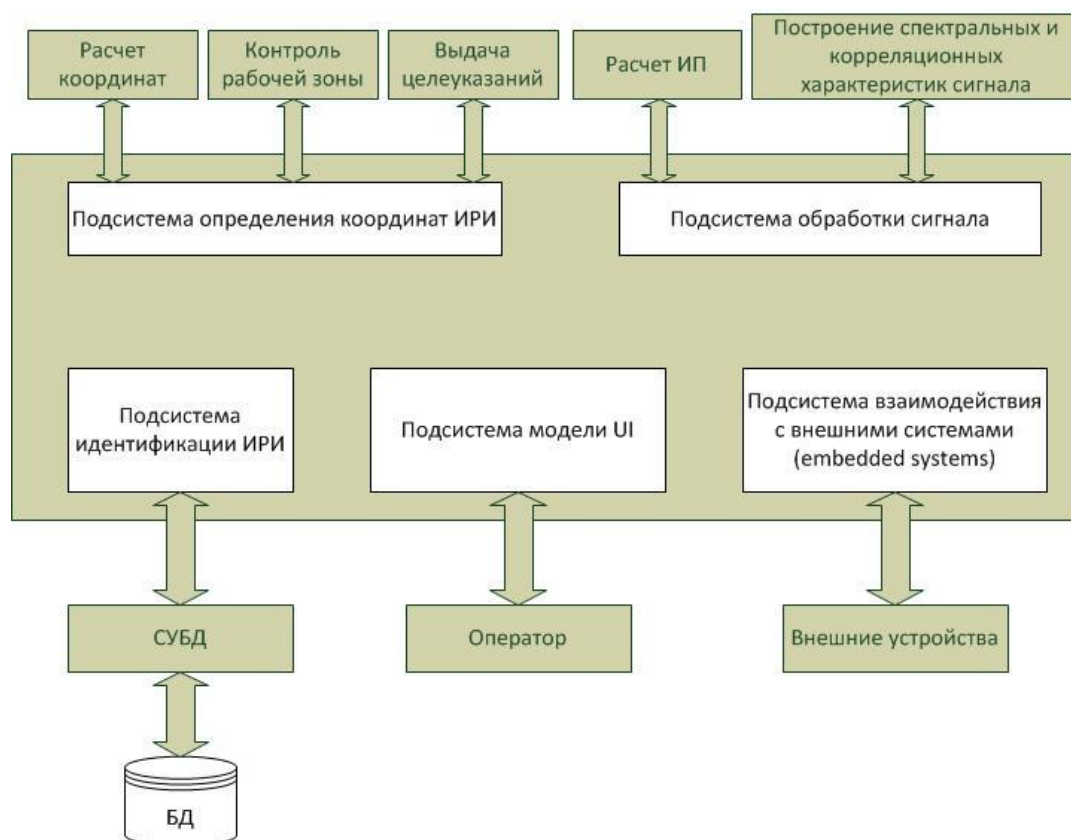


Рис. 4.4. Архитектура системы управления КПРМ

Подсистема взаимодействия с внешними устройствами является важнейшей частью back-end ИС. Сложность ее разработки определяется большим количеством физических устройств (и интерфейсов), взаимодействие с которыми должна осуществлять ИС. Другая сложность заключается в сложности аппаратной реализации комплекса (см. рис. 4.1) и требовании одновременной обработки сигналов от различных устройств в real-time режиме [114].

Основной целью подсистемы обработки сигнала является определение ИП, характеризующих местоположение цели, а также определение параметров для идентификации ИРИ [115]. Основными задачами данной подсистемы являются:

- прореживание и программная фильтрация сигналов;
- выделение импульсных сигналов от различных источников согласно правилу «чистой тройки» и/или «чистой четверки»;

- расчет корреляционных характеристик для непрерывного сигнала;
- расчет ИП (временных задержек);
- расчет параметров для идентификации ИРИ.

Также подсистема обработки сигналов выполняет построение следующих существенных для оператора характеристик:

- амплитудный и частотный спектр;
- амплитудно-фазовая частотная характеристика
- автокорреляционная функция;
- взаимно-корреляционная функция;
- амплитудно-частотная панорама;

Известно, что алгоритм определения ИП зависит от характера сигнала. При импульсном излучении (которое характерно для большинства летательных аппаратов) для определения временных задержек достаточно знать время прихода отдельных пачек импульсов на станции комплекса. При непрерывном сигнале дополнительно требуется корреляционная обработка сигнала [116].

Основной задачей КПРМ является определение координат ИРИ. Поэтому подсистеме определения координат ИРИ уделяется особое внимание при разработке ИС. Качество разработки данной подсистемы определяет эффективность комплекса в целом [117]. Программно подсистема определения координат ИРИ реализована в виде отдельного модуля, в котором на вход подаются ИП, характеризующие местоположение ИРИ (временные задержки, пеленги). Результатом работы модуля является вектор координат цели. Модульная организация и стандартный интерфейс позволяют осуществлять переключение между подсистемами определения координат ИРИ в режиме реального времени [118]. Это важно для разрабатываемого алгоритма определения координат ИРИ, который может работать только при наличии избыточной информации о местоположении цели. При отсутствии подобной информации, расчет координат осуществляется на основе стандартных РДМ и ТМ [119,120].

Помимо собственно определения координат, подсистема осуществляет

контроль РЗ и выдачу целеуказаний для построения трасс приоритетных целей. Задание РЗ осуществляется оператором непосредственно на электронной карте местности, а также путем ввода координат опорных точек [121].

После определения координат цели выполняется идентификация ИРИ и запись информации в БД. Задача идентификации ИРИ является сложной. На сегодняшний день, в подсистеме обработки сигналов определяются следующие параметры, используемые для идентификации [122]:

1) параметрические критерии:

- период повторения импульсов;
- количество периодов;
- период возбуждения;
- длительность импульсов;
- серия импульсов;
- длительность серии импульсов;
- период повторения серии импульсов;
- амплитудная огибающая серии импульсов;
- амплитуда импульсов;
- несущая частота;
- количество несущих частот;
- тип внутриимпульсной модуляции;
- частотный спектр одиночного импульса;
- огибающая частотного спектра серии импульсов;
- частотный спектр одиночного импульса;
- огибающая частотного спектра одиночного импульса;
- статистические характеристики параметров сигналов;

2) аппаратные параметрические погрешности

- временные;
- частотные;
- амплитудные;
- пеленгационные;

- 3) радиус мертвой зоны;
- 4) временное окно для ТМ;
- 5) период сканирования РЛС
- 6) максимально-допустимый угол между пересекающимися пеленгами двух станций;
- 7) сектор сканирования для АФС РЛС
 - пересекающиеся пеленги;
 - массив пеленгов на цели;
 - массив моментов измерения пеленгов на цели;
 - массив пересечений пеленгов на цели;
 - массив моментов измерения пересечений пеленгов на цели;
 - единица измерения пеленговых пересечений;
 - точка пересечения;
 - эллипс ошибки;
 - множественные парные пересечения пеленгов в одной точке пространства;
- 8) массив координат цели:
 - массив моментов расчета координат цели
 - вектор цели (след цели)
 - текущее временное окно выборки для вектора цели

Основным клиентом ИС является оператор станции. Для обеспечения связи между ИС и оператором используется подсистема модели UI (user interface). Использование данной модели обеспечивается абстрактность и легкую заменяемость системы UI в случае использования алгоритма в составе иных программных продуктов. Информация о всех графических элементах сохраняется в отдельных xml-файлах, которые могут быть легко отредактированы разработчиком [123, 124].

При интеграции подсистемы модели UI в ИС использовалась «модель рефлектора». Структурная схема данной модели представлена на рис. 4.5:

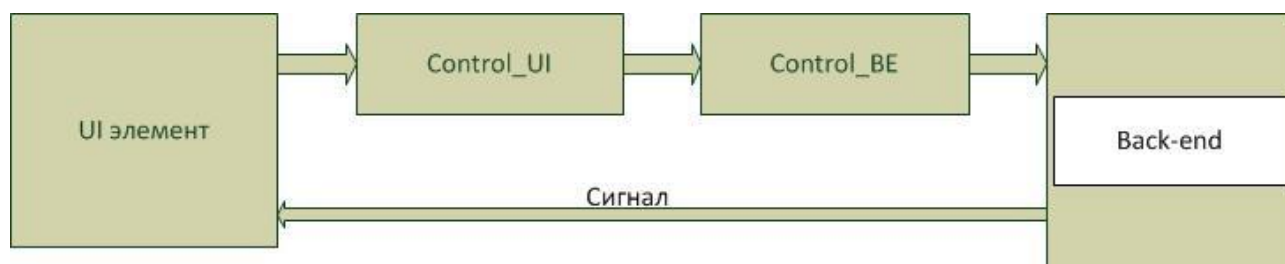


Рис. 4.5. Структурная схема рефлекторной модели UI

Класс `Control_UI` выполняет роль посредника во взаимодействии UI с back-end ИС. Использование данного класса обеспечивает абстрактность UI - элементов программы. Контроллер `Control_UI` не зависит от используемых UI-элементов, он лишь обеспечивает определенный набор команд для управления back-end, которые передаются в контроллер back-end – класс `Control_BE`. Использование подобного рода контроллеров обеспечивает легкую переносимость программного кода при изменении концепции UI [125].

Аналогичную задачу выполняет класс `Control_BE`, который осуществляет непосредственное управление back-end.

Классы `Control_UI` и `Control_BE` обеспечивают «слабую» связь в архитектуре ИС [126]. Использование «слабой» связи ведет к упрощению разработки при изменении проектных требований.

Рефлекторная модель UI заключается в том, что изменение состояния UI – элементов происходит лишь при поступлении соответствующего сигнала из back-end. Другими словами, UI – элемент изменяет свое содержимое лишь по факту изменения состояния в back-end. В случае неудачи или ошибки внутри back-end, содержимое UI – элемента останется неизменным, что является дополнительным средством визуального контроля для пользователя [127]. Использование рефлекторной модели UI лежит в основе рассматриваемой подсистемы.

Таким образом, схема информационных потоков в системе управления КПРМ представлена на рис. 4.6:

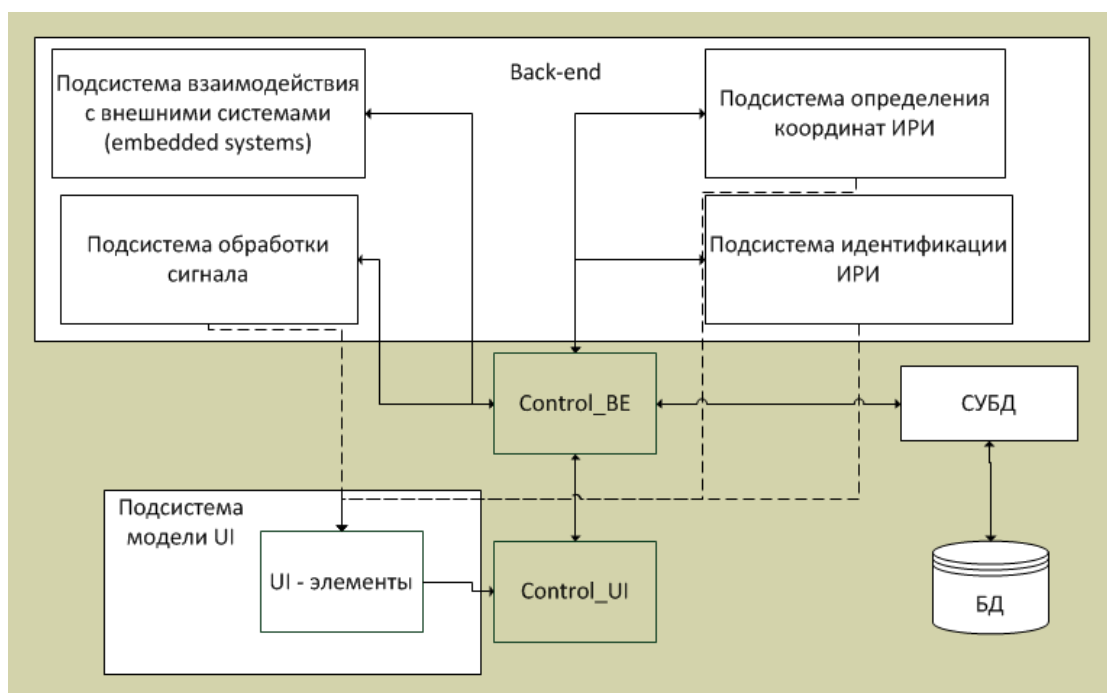


Рис. 4.6. Схема информационных потоков в системе управления КИРМ

Построение информационной системы осуществляется на базе операционной системы Windows XP. Комплексы, которые помимо определения координат осуществляют также подавление сигнала, имеют более строгие требования к времени отклика ОС. В таких комплексах основной рабочей ОС является RTOS (real-time operation system) QNX [128].

Пример окна управляющей программы пассивного радиолокационного комплекса представлен на рис. 4.7.

Общие вопросы, связанные с построением и адаптацией информационных систем изложены в [102, 103, 104].

Реализация алгоритмов, реализующих разработанные методы определения координат ИРИ, выполнена в ПАО «СКБ РТУ» и используется в комплексах пассивной разведки производства ПАО «Топаз».

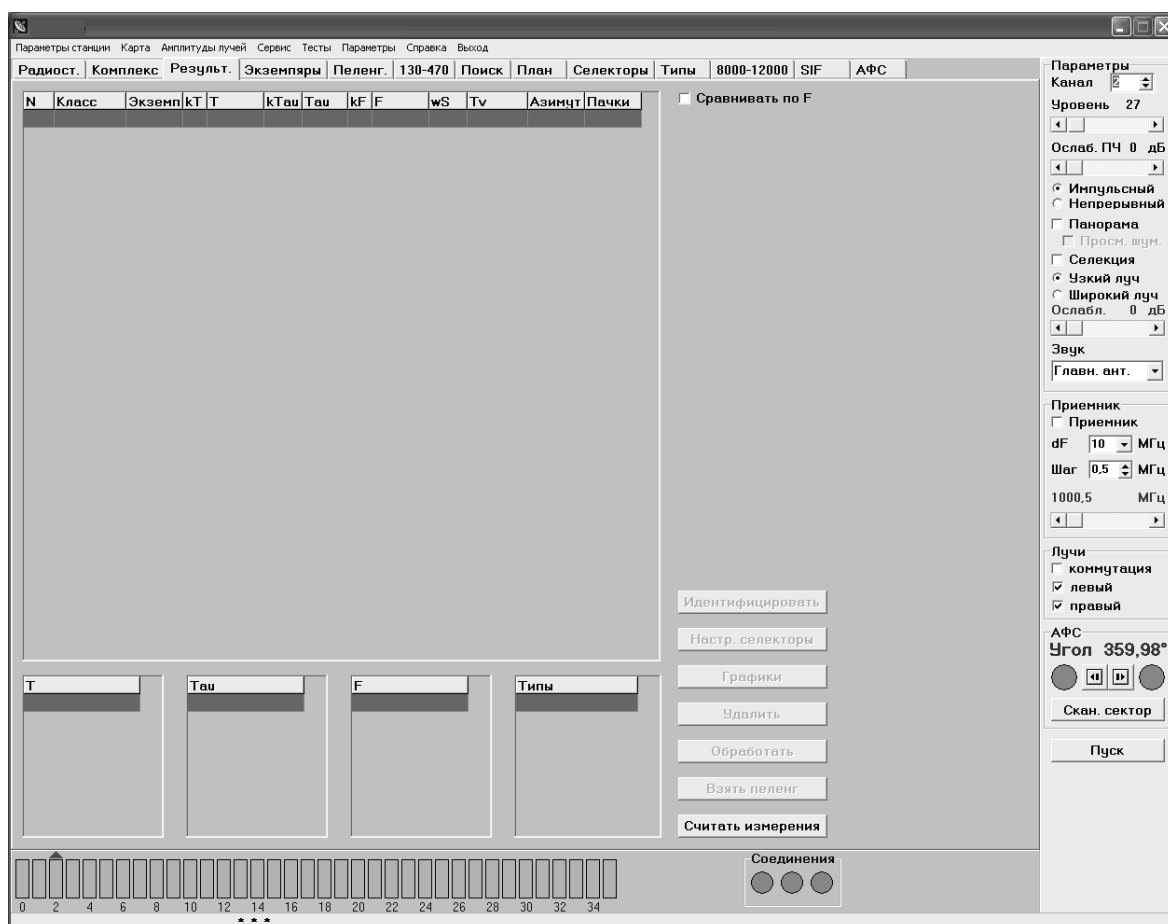


Рис. 4.7. Окно управляющей программы КПРМ

4.2 Алгоритмическая реализация методов повышения точности определения координат ИРИ

Одной из основных задач систем радиолокации является идентификация ИРИ, то есть свойств и характеристик сигналов, соответствующим этим источникам, а также их координат. Учитывая особенности работы систем как пассивного, так и активного радиомониторинга, важной является научно-практическая задача интеграции работы систем обоих типов как единого целого [129].

Преимуществами систем пассивного радиомониторинга являются скрытность работы, а также широкие аппаратно-программные возможности анализа принимаемых сигналов, а главным недостатком является довольно высокая погрешность, до 10%, определения координат ИРИ. Блок-схема

определения координат ИРИ пассивной системой радиомониторинга представлена на рис. 4.8 [130].



Рис. 4.8. Блок-схема определения координат ИРИ системой пассивного радиомониторинга на основе классического РДМ

Точность определения координат пассивными средствами радиомониторинга может быть повышена за счет иного подхода к решению системы уравнений РДМ, основанного на экстремальной постановке квадратичного функционала, состоящего из суммы невязок этих уравнений с весовыми коэффициентами, учитывающими погрешность определения координат каждой из станций в отдельности (рис. 4.9) [131].



Рисунок 4.9. Блок-схема определения координат ИРИ системой пассивного радиомониторинга при помощи экстремальной постановки РДМ

В свою очередь, активные системы являются гораздо более точным средством определения координат ИРИ (погрешность составляет до 2 %), однако, они легко могут быть определены другими средствами радиомониторинга и не являются средством идентификации сигналов ИРИ [132].

Ввиду вышесказанного задача определения координат может быть решена совместно как пассивной, так и активной системами совместно, в то время, как анализ принимаемых сигналов может быть возложен на пассивную систему. В этом случае блок-схема алгоритма определения координат будет

включать в себя уже и активную составляющую системы: высотомера или трехкоординатной активной РЛС (рис. 4.10).



Рис. 4.10. Блок-схема определения координат ИРИ системой пассивно-активного радиомониторинга на основе экстремальной постановки РДМ

Особенности задач, решаемых объектами, на которых размещается радиолокационное оборудование, среда, в условиях которой эти объекты функционируют: наземная, надводная, воздушная, исполнение объектов, требования к их мобильности в значительной мере определяют выбор сигналов и их характеристики [133]. В связи с этим возникает необходимость обзора параметров и характеристик сигналов с учетом специфики объектов [134]. Цель такого обзора можно сформулировать как обоснование информативных

параметров радиоизлучения средств наземного базирования, а также установленных на судах и летательных аппаратах. Это позволит обосновать требования к структуре и параметрам информационно-измерительной системы (ИИС), функционирующей в составе станций пассивного радиотехнического контроля. Так как наиболее мощными и распространенными источниками радиоизлучения являются радиолокационные станции (РЛС), то основное внимание, как правило, уделяется излучающему оборудованию РЛС и сигналам, которые излучаются ими в окружающее пространство [135]. В соответствии с этим выделены объекты радиоизлучения (ОР): самолетные, наземные и корабельные РЛС.

Для анализа и идентификации ОР могут быть использованы частотные, временные и частотно-временные характеристики сигналов.

К числу частотных параметров относятся:

- значения частот излучаемых колебаний;
- границы диапазонов и их изменения при перестройке;
- значения частот излучения при дискретной перестройке;
- частоты следования радиоимпульсов излучения;
- значения частот следования радиоимпульсов излучения при дискретной перестройке;

К числу временных параметров относятся:

- характер радиоизлучения (непрерывный или импульсный);
- значение длительности импульсов радиоизлучения;
- значение длительности импульсов радиоизлучения при дискретной перестройке;

К частотно-временным параметрам относятся:

- характер изменения частоты радиоизлучения во времени (неизменная, изменяющаяся от импульса к импульсу, изменяющаяся в пределах импульса);
- характер изменения мгновенной частоты радиоизлучения в пределах импульса (линейный, скачкообразный, псевдослучайный, случайный);
- характер изменения частоты следования импульсов радиоизлучения

(неизменная, изменяющаяся по задаваемому закону, изменяющаяся случайным образом).

Анализ типовых РЛС позволяет сделать общие выводы о том, что при разработке требований к информационно-измерительным системам идентификации типовых объектов радиолокации по параметрам радиоизлучений необходимо учитывать следующее:

1. РЛС могут быть источниками как импульсного, так и непрерывного излучения, причем как частотные, так и временные параметры излучения могут изменяться в процессе функционирования РЛС по сложному, в том числе случайному закону. Указанное обстоятельство не позволяет обрабатывать такие сигналы при помощи подходов, применимых к стационарным процессам. В частности, исключаются методы обработки, использующие гипотезы стационарности и эргодичности.
2. Нестационарность сигналов, отображающих радиоизлучение РЛС, обуславливает необходимость оценивания их информативных параметров в течение всего времени наблюдения излучения источников. Сокращение этого времени или использование для таких оценок ограниченных временных сегментов сигналов может существенно снизить их информативность, что повлечет за собой ухудшение достоверности идентификации. Данное обстоятельство указывает на необходимость обработки полноразмерных реализаций сигналов, отображающих радиоизлучение, средствами получения динамических спектральных оценок в реальном масштабе времени.
3. Сложный характер изменения и нестационарность зондирующих сигналов, отображающих закон изменения во времени излучений РЛС, обуславливают необходимость использования последовательной процедуры их анализа в информационно-измерительной системе, начиная от обнаружения радиоизлучения в некотором, достаточно широком диапазоне, последующего уточнения параметров радиоизлучения в процессе наблюдения за ним, получения оценок параметров по

результатам наблюдения на достаточно протяженном (но не допускающем потерю актуальности данных) интервале времени, и, наконец, идентификацию на этой основе источников излучений.

4. Ввиду того, что диапазоны возможных значений одноименных, информативных параметров радиоизлучений для различных РЛС могут перекрываться, однозначная идентификация по одному параметру (например, частотному) оказывается невозможной. Для повышения достоверности идентификации необходимо комплексное использование максимального количества информативных параметров, характеризующих текущее состояние источника радиоизлучения в условиях ограниченного сверху времени идентификации обнаруженного объекта.

В некоторых случаях информация для идентификации РЛС может быть получена по результатам сравнения частотных спектров следующих друг за другом посылок, поэтому в информационно-измерительной системе необходимо предусмотреть средства для сравнительного анализа соседних посылок.

Так как частотные посылки, формируемые передатчиками РЛС, являются узкополосными сигналами, изменения в тонкой структуре их текущих спектров могут оказаться трудноразличимыми визуально без использования специальных средств анализа и визуализации, поэтому целесообразно предусмотреть:

- непрерывный частотный анализ текущего спектра, развертываемого во времени сигнала с обнаружением участков изменения его основной (центральной) частоты;
- выделение участков текущего спектра, где имеют место аномальные частотно-временные явления (изменения основной частоты сигнала по непрерывному закону, скачки частоты и т.д.);
- режим частотно-временной лупы для детального изучения закона изменения спектра на выделенных участках;

- систему маркеров для выделения участков с аномальными частотно-временными явлениями, а также средства для определения их протяженности по временной и частотной оси;

4.3 Принятие решений при идентификации ИРИ по параметрам формируемых ими излучений

Задача идентификации объекта ИРИ средствами пассивной радиолокации относится к динамической, решаемой в непрерывно изменяющихся условиях, что определяется несколькими факторами, связанными с особенностями как идентифицируемых объектов, так и систем локации, относимых к разряду специализированных ИИС:

- изменение условий приема сигналов, поступающих от объектов при их перемещении по отношению к приёмным антеннам локационной станции, маневрировании объекта, изменении характеристик и параметров формируемого им излучения, в том числе и помех;

- изменение свойств приёмных каналов радиолокационной станции в условиях непрерывных изменений характеристик, поступающих на входы сигналов, вызванные, прежде всего перегрузками и действием помех;

- ограниченное время пребывания объекта в зоне наблюдения;

- требование своевременности, актуальности и максимальной полноты информации, доступной к получению в каждый момент наблюдения за объектом.

Накопление данных о параметрах излучения в течение сеанса наблюдения объекта позволяет производить непрерывное уточнение принимаемых решений, с тем, чтобы к заданному моменту окончания сеанса наблюдения достоверность его идентификации была бы достаточной для принятия необходимых оперативных действий. Если рассматривать задачу идентификации с учетом указанной специфики, то в её составе необходимо выделить несколько этапов принятия решений в зависимости от объема

имеющихся на рассматриваемый момент наблюдения данных, условий их получения и обработки техническими средствами ИИС. Наиболее целесообразно выделить следующие этапы в выработке окончательного решения идентификации:

1. Обнаружения радиоизлучения в полосе частот наблюдения и отнесение его к некоторому частотному диапазону первичной обработки сигналов – носителей информации о параметрах излучения объекта.
2. Оценивание энергетических характеристик наблюдаемых информативных сигналов и принятие решений о достижении достаточного уровня сигнал-шум для выполнения измерения параметров радиоизлучения.
3. Оценивание уровня помех и принятие решений о применении дополнительных мер повышения помехозащищенности измерительных каналов ИИС.
4. Оценивание значений информативных параметров радиоизлучения, накопление поступающих данных о результатах оценивания и принятие решений о принадлежности истинных значений параметров диапазонам значений, позволяющим производить идентификацию объектов по совокупности всех измеренных параметров с достаточной степенью достоверности.
5. Комплексный анализ полученных результатов измерения информативных параметров излучения и принятие решений о принадлежности наблюдаемого объекта к заданному классу, типу, образцу и др.

Системы наблюдения и контроля объектов радиоизлучения представляют собой сложные радиотехнические комплексы, в работе которых задействованы не только аппаратные и программные средства, базы знаний и данных, но и интеллектуальные ресурсы экспертов. Решения разных уровней в таких системах принимаются не только автоматически техническими средствами на основе формальных алгоритмов, но и операторами, на основе своего и заимствованного опыта. С учетом этого необходимо рассмотреть, как основы

построения формальных алгоритмов принятия решений, так и особенности принятия решений экспертом с целью выяснения условий обеспечения максимальной достоверности идентификации.

Первая из перечисленных выше задач принятия решения – обнаружения радиоизлучения в полосе частот радионаблюдения ΔF решается многоканальным приёмником, содержащим m однотипных каналов, каждый из которых обеспечивает выделение энергии радиоизлучения в своей полосе частот Δf_i , ($i = 1, 2, \dots, m$) и сравнение с некоторым пороговым значением E_i (рис. 4.11).

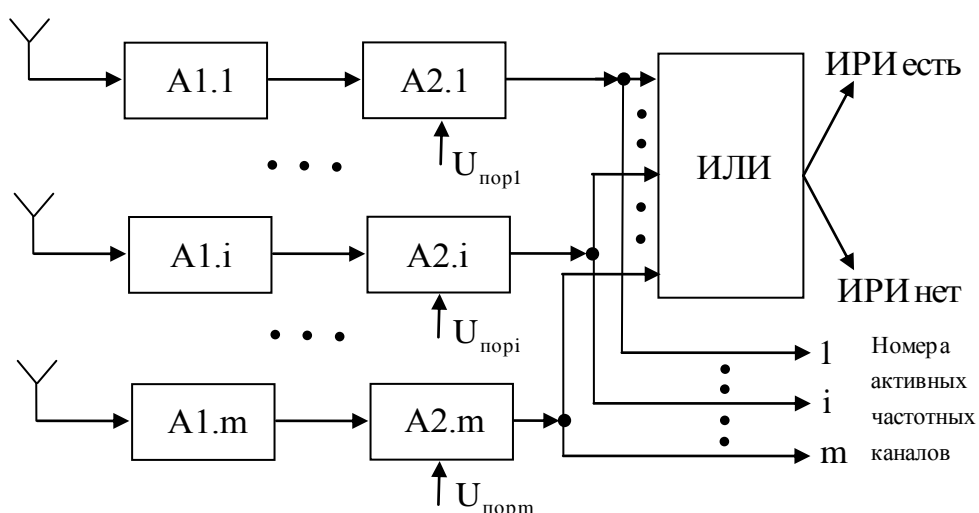


Рис. 4.11. Структура многоканального приемника для обнаружения

$$\text{радиоизлучения в полосе частот } \Delta F = \sum_{i=1}^m \Delta f_i$$

В состав m -канального приёмника входит m частотных каналов, каждый из которых включает $A1$ – устройство выделения информативных признаков сигнала, $A2$ – решающая схема.

Так как в системах пассивной радиолокации невозможно воспользоваться информацией о фазе приходящего сигнала, а информация о частоте может быть использована только на уровне распределения всего диапазона наблюдения на поддиапазоны (полосы), структура каждого частотного канала реализуется на

основе полосовой фильтрации (рис. 4.12).

Показатели достоверности обнаружения излучения цифровыми одноканальными приёмниками, как правило, определяются из условий приёма сигнала с аддитивной помехой в виде нормального шума. Распределение огибающей шума на выходе узкополосного фильтра подчиняется закону Релея:

$$\omega(U_{ш}) = \frac{U_{ш}}{\sigma_{ш}^2} \exp\left(-\frac{U_{ш}^2}{2\sigma_{ш}^2}\right) \quad (4.1)$$

где $U_{ш}$ и $\sigma_{ш}$ - мгновенное и среднеквадратическое значение шума на выходе полосового фильтра.

Если порог принятия решения обозначить через β , то вероятность ложной тревоги $P_{лт}$ может быть найдена по формуле

$$P_{лт} = \int_{\beta}^{\infty} \frac{U_{ш}}{\sigma_{ш}^2} \exp\left(-\frac{U_{ш}^2}{2\sigma_{ш}^2}\right) dU_{ш} \quad (4.2)$$

Когда на приёмник воздействует и сигнал, и шум, то распределение огибающей результирующего распределения на выходе фильтра подчиняется обобщенному закону Релея

$$\omega(U_{c+ш}) = \frac{U_{c+ш}}{\sigma_{ш}^2} \exp\left(-\frac{U_{c+ш}^2 + U_c^2}{2\sigma_{ш}^2}\right) \cdot I_0\left(\frac{U_c \cdot U_{c+ш}}{\sigma_{ш}^2}\right) \quad (4.3)$$

где U_c - максимальная амплитуда сигнала на выходе фильтра, которая считается известной величиной, определяемой через СКО помех $\sigma_{ш}$ и допустимое соотношение сигнал-шум $q_0 = U_c / \sigma_{ш}$; I_0 - функция Бесселя нулевого порядка от мнимого аргумента;

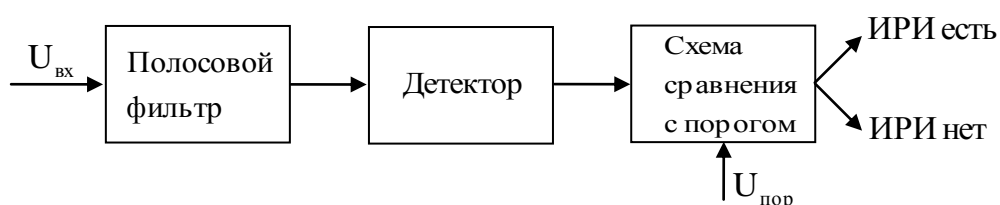


Рис. 4.12. Структура фильтрового одноканального приёмника для обнаружения радиоизлучения в полосе частот Δf_i

С учетом введенных соотношений, вероятность правильного обнаружения P_{no} может быть определена по формуле:

$$P_{no} = \int_{\beta}^{\infty} \omega(U_{c+u}) dU_{c+u} = \int_{\beta}^{\infty} \frac{U_{c+u}}{q_0} \cdot \exp\left(-\frac{U_{c+u}^2 + q_0^2}{2q_0}\right) \cdot I_0(U_{c+u}) dU_{c+u} \quad (4.4)$$

Формулы (2) – (4) могут быть объединены, учитывая соотношение сигнал-шум. Для принятых $P_{лм} \leq 0,1$ и $P_{no} \geq 0,9$ эта зависимость может быть представлена в упрощенном виде

$$q_0 = 2 \cdot \left(\sqrt{\ln \frac{1}{P_{лм}}} + \sqrt{\ln \frac{1}{1+P_{no}} - 1,4} \right)^2 \quad (4.5)$$

При неизменном пороге принятия решений, требования по показателям P_{no} и $P_{лм}$ по-разному влияют на необходимое значение сигнал-шум. Так при $P_{no} = 0,99$ и $P_{лм} = 10^{-5}$, необходимое значение $q_0 = 53,6$, если же $P_{лм} = 0,9$ и $P_{no} = 0,1$, то значения соотношения сигнал-шум должно быть $q_0 = 12,2$.

Так как сигналы РЛС в большинстве случаев имеют импульсный характер, то возможной мерой улучшения достоверности является их накопление. Но накопление возможно только после нелинейной обработки сигналов детектором огибающей, так как в исходном виде эти сигналы имеют случайную начальную фазу. С другой стороны, нелинейная обработка ухудшает соотношение сигнал-шум после детектора огибающей. Если характеристика детектора аппроксимируется квадратичной параболой вида $U_{вых} = a \cdot U_{вх}^2$, а соотношение сигнал-шум на его входе равно $U_c / \sigma_{ш} = \sqrt{q_0}$, то на его выходе отношение сигнал-шум будет равно

$$\frac{U_{вых.с}}{U_{вых.ш}} = \frac{U_c^2}{2U_c \sigma_{ш} + \sigma_{ш}^2} \quad (4.6)$$

Из приведенной формулы следует, что при большем соотношении сигнал-шум на входе, то есть $q_0 \gg 1$ и $U_c \gg \sigma_{ш}$, на выходе имеем

$$\frac{U_{вых.с}}{U_{вых.ш}} \approx \frac{U_c}{2\sigma_{ш}} \gg 1 \quad (4.7)$$

Если же $q_0 \ll 1$ и $U_c \ll \sigma_{ш}$, то выходное соотношение сигнал-шум много

меньше единицы

$$\frac{U_{\text{вых.с}}}{U_{\text{вых.ш}}} \approx \left(\frac{U_c}{\sigma_{ш}} \right) \ll 1 \quad (4.8)$$

Из приведенных соотношений следует: в первом случае детектор ухудшает соотношение примерно в 2 раза, во втором случае ухудшение может составлять сотни – тысячи раз.

Если обнаружение ведется по пачке из N_c сигналов и требуется для достижения необходимой достоверности распознавания обеспечить соотношение на его входе $q_{0\Sigma}$, то с учетом коэффициента $\alpha_{\text{дем}}$ потерь в детекторе отношение сигнал-шум одиночного сигнала должно составлять

$$q_{01} = \frac{q_{0\Sigma}}{N_c} \cdot \alpha_{\text{дем}} \quad (4.9)$$

Из приведенных результатов анализа показателей достоверности обнаружения радиоизлучения одним каналом приёмника следует, что решающее значение на достоверность оказывает исходное соотношение сигнал-шум на входе фильтра. Ухудшение указанного соотношения во много раз может ухудшить соотношение на входе устройства принятия решения. При малых соотношениях сигнал-шум на входе приёмника попытка улучшить его на входе решающего устройства за счет накопления может оказаться неэффективной. Учитывая также, что при отсутствии априорной информации о параметрах обнаруживаемого сигнала сама постановка задачи построения оптимальной фильтрующей схемы некорректна, следует констатировать весьма существенную ограниченность набора средств повышения достоверности при недостаточных значениях соотношения сигнал-шум.

Рассмотренное выше распространяется на случай, когда обнаруживаемый сигнал имеет стабильную амплитуду, например, когда между источником излучения и приёмной антенной прямая видимость, отсутствует многолучевое распространение волн и объект неподвижен. В реальности эти условия не выполняются и амплитуда приходящего сигнала изменяется случайным образом. Как показывают исследования, проведенные в [8], структура

приёмника и его алгоритм остаются прежними, однако, для достижения тех же показателей достоверности $P_{лм}$ и $P_{но}$ требуется большее значение средней величины соотношения сигнал-шум на его входе

$$q_{0cp} = 2 \left(\frac{\lg 1/P_{эл}}{\lg 1/P_{но}} - 1 \right) \quad (4.10)$$

Зависимость (10) может быть использована для построения рабочих характеристик приёмника. Их анализ [10] указывает на существенное влияние незнания амплитуды на показатели достоверности обнаружения. В частности, в той области характеристик, где $P_{но}$ велико, а $P_{лм}$ мало, незнание амплитуды приводит к существенному увеличению (в сотни раз) требуемого значения сигнал-шум. В области малых значений $P_{но}$ случайные изменения амплитуды (её выбросы) могут, наоборот, облегчить обнаружение.

Для оценивания показателей достоверности обнаружения многоканального приёмника, построенного на основе использования идентичных m каналов необходимо найти зависимость вероятностных характеристик всей системы от вероятностей $P_{но.i}$ и $P_{лм.i}$ ($i = 1, 2, \dots, m$) отдельного i -го канала. В силу идентичности схем обработки и независимости действующих в них шумов вероятности правильного обнаружения и вероятности ложной тревоги в различных каналах можно считать одинаковыми $P_{лм.i} = P_{лм.j}$ и $P_{но.i} = P_{но.j}$ при $i \neq j$. Вероятность ложного обнаружения сигнала системой связана с вероятностью ложного обнаружения отдельными каналами соотношением $P_{лм} = 1 - (1 - P_{лм.i})^m$. При $P_{лм.i} \ll 1$ в биномиальном ряду $P_{лм}$ можно ограничиться первыми двумя членами, тогда

$$P_{лм} = m \cdot P_{лм.i} \quad (4.11)$$

Формула (11) показывает, что вероятность ложной тревоги в m -канальной системе в m раз больше вероятности ложной тревоги в отдельной схеме обработки.

Вероятность пропуска P_{np} сигнала многоканальным приёмником равна

произведению вероятностей $P_{np.i}$ пропуска в соответствующем канале на вероятности $[(1 - P_{лм.i})^{m-1}]$ не превышения шумовым напряжением порога во всех остальных схемах и выражается $P_{np} = P_{np.i} \cdot [(1 - P_{лм.i})^{m-1}]$. Для случая, когда $[(m-1) \cdot P_{лм.i}] \ll 1$, второй сомножитель можно принять равным 1, и, принимая во внимание, что вероятность пропуска и правильного обнаружения однозначно определяют друг друга $P_{np} = 1 - P_{no}$ и $P_{np.i} = 1 - P_{no.i}$, получим

$$1 - P_{no} \approx 1 - P_{no.i}, \text{ или } P_{no} \approx P_{no.i} \quad (4.12)$$

то есть вероятность правильного обнаружения в системе из m идентичных приёмников примерно равна вероятности правильного обнаружения отдельным каналом.

Наряду с ложным обнаружением и пропуском сигнала в многоканальном приёмнике могут иметь место искажения, состоящие в том, что при наличии i -го сигнала порог будет превышен в j -й схеме и создается впечатление, что присутствует j -й сигнал. Вероятности искажения $P_{иск}$ и правильного указания $P_{нус}$ однозначно определяют друг друга $P_{иск} = 1 - P_{нус}$. Проведя аналогичные рассуждения, найдем, что вероятность правильного указания равна $P_{нус} = P_{no.i} \cdot (1 - P_{лм.i})^{m-1}$. Учитывая, что для $m \gg 1$, $(1 - P_{лм.i})^{m-1} \approx 1 - m \cdot P_{лм.i}$, получим вероятность искажения $P_{иск} = 1 - P_{нус} = 1 - P_{no.i} + m \cdot P_{no.i} \cdot P_{лм.i}$, которую можно выразить через вероятностные характеристики всей m -канальной системы, учитывая формулы (11) и (12):

$$P_{иск} = 1 - P_{no} + P_{no} \cdot P_{лм} \quad (4.13)$$

Формулы (11) и (12) позволяют просто перейти от приведенных выше соотношений (5) и (10) для рабочих характеристик одного канала к рабочим характеристикам многоканального приёмника. Для этого следует произвести замену в формулах (5) и (10), стоящих там вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги для одного канала, соответствующими вероятностями для m -канальной системы, и, сделав преобразования, получим выражения рабочих характеристик приёмника для случаев обнаружения

сигнала с неизвестной фазой

$$q_0 = 2 \left(\sqrt{\ln m + \ln \frac{1}{P_{лм}}} + \sqrt{\ln \frac{1}{1 - P_{но}} + 1,4} \right) \quad (4.14)$$

и неизвестными фазой и амплитудой

$$q_{0cp} = 2 \left(\frac{\lg m + \lg 1/P_{лм}}{\lg 1/P_{но}} - 1 \right) \quad (4.15)$$

Соотношения (14) и (15) показывают, что если положение сигнала на временной и частотной осях заранее неизвестно (случай на практике), то при m -канальном обнаружении возрастает необходимое соотношение сигнал-шум, обеспечивающее требуемые $P_{но}$ и $P_{лм}$, достигнутые одноканальным приёмником. Однако, это увеличение невелико, так как во все формулы, определяющие значение q_0 , входит логарифм числа каналов m .

Вторым этапом в перечне решений при идентификации объекта является оценивание энергетических характеристик наблюдаемых сигналов и принятие решения о достаточности соотношения сигнал-шум для выполнения измерения параметров излучения. Оценивание ведется по выходному напряжению активного канала приёмника. Конечной целью оценивания является нахождение среднего значения выходного напряжения детектора огибающей. Для принятия решения о текущем соотношении сигнал-шум необходимо также найти среднеквадратическое значение отклонения выходного напряжения. Так как при идентификации объектов методом пассивной радиолокации априорных сведений о наблюдаемом сигнале нет (в отличие от активной локации), то оптимальный приёмник в системах пассивной локации вычисляет отношение правдоподобия или момент функции правдоподобия.

В дальнейшем будем считать, что выходное напряжение приёмника пропорционально функции правдоподобия. А так как максимум экспоненты совпадает с максимумом его показателя, то задача оценки будет состоять в отыскании максимума выходного напряжения $U_{вых}(e)$, зависящего от энергетического параметра e обнаруженного излучения, согласно [8],

упомянутая зависимость имеет вид

$$U_{\text{вых}}(e) = S(e) + H(e),$$

где $S(e)$ - сигнальная, а $H(e)$ - шумовая функция. Известно, что сигнальная функция является регулярной и $U(e) = q_0 \cdot K_0(\Delta e)$, где $K_0(\Delta e)$ - нормированная автокорреляционная функция принимаемого сигнала по параметру e .

В тех случаях, когда $q_0 \ll 1$, выходное напряжение приёмника содержит многочисленные шумовые выбросы, превосходящие приращение, вызванное наблюдаемым сигналом, и однозначное оценивание в таких случаях невозможно, так как вероятность ошибки велика. При $q_0 \gg 1$ и $q_0 \gg \sqrt{q_0}$, приращение $U_{\text{вых}}$, вызванное наблюдаемым сигналом, значительно больше шумовых выбросов, что обеспечивает малую вероятность ошибки. Чем больше e , тем меньше искажается шумом сигнальная функция, тем меньше смещение максимума выходного напряжения относительно энергии излучения, и тем меньше дисперсия оценки \hat{e} и выше точность оценки.

Сигнальная функция всегда четная и симметрична относительно истинного значения e_0 . Поэтому при $q_0 \gg 1$ среднее по множеству оценок должно быть равно истинному значению, то есть обеспечивается несмещённость оценки. Кроме того, теория показывает [9], что при нормальном шуме и $q_0 \gg 1$ метод максимума правдоподобия даёт асимптотически эффективную оценку. С другой стороны, из самой сути метода максимума функции правдоподобия можно утверждать, что дисперсия оценки и вероятность ошибочного решения (рис. 2.11) будут тем меньше, чем уже пик сигнальной функции и уже автокорреляционная функция входного сигнала по измеряемому параметру e .

Для нахождения оценки \hat{e} истинного значения параметра $e = e_0$, необходимо найти значение \hat{e}_0 , соответствующее максимуму $U_{\text{вых}}(e)$. Приравнявая производную от $U_{\text{вых}}(e)$ нулю, получим

$$S'(\hat{e}_0) + H'(\hat{e}_0) = \frac{d}{de} S(e)|_{e=\hat{e}_0} + \frac{d}{de} H(e)|_{e=\hat{e}_0} = 0.$$

При $q_0 \gg 1$ оценка $\hat{e}_0 \cong e_0$, и если во второе слагаемое вместо \hat{e}_0 подставить e_0 , то статистические характеристики случайной функции $H(e)$ при стационарном входном процессе практически не изменятся [9]:

$$S'(\hat{e}_0) + H'(\hat{e}_0) = 0 \quad (4.16)$$

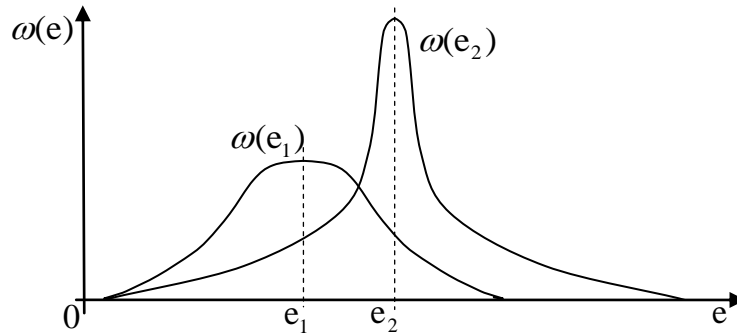


Рис. 4.13. Плотность вероятности e для малых $\omega_1(e)$ и больших $\omega_2(e)$ отношений сигнал-шум

Разложим функцию $S(e)$ в ряд Тейлора в окрестности точки e_0

$$S(e) = S(e_0) + (e - e_0) \cdot S'(e_0) + \frac{(e - e_0)^2}{2} \cdot S''(e_0) + \dots,$$

в котором первое слагаемое — постоянная составляющая, второе, вследствие четности $S(e)$, равно 0. Поэтому при дифференцировании $S(e)$ в формуле (16) получим соотношение

$$(\hat{e}_0 - e_0) \cdot S''(e_0) + H'(e_0) = 0.$$

Учитывая, что $S''(e_0)$ — неслучайная величина, получим дисперсию оценки

$$\sigma^2(e) = \sigma^2(\hat{e}_0 - e_0) = \frac{1}{[S''(e_0)]^2} \cdot \sigma^2[H'(e_0)] \quad (4.17)$$

Представим шумовую функцию в виде $H(e) = \sqrt{q_0} \cdot h(e)$, где $h(e)$ — нормированный случайный процесс со среднеквадратичным значением, равным единице, и произведя подстановку в формулу (17), будем иметь

$$\sigma^2(e) = \frac{q_0 \cdot \sigma^2[h'(e_0)]}{[S''(e_0)]^2} \quad (4.18)$$

В [130] доказываем, что $h'(e_0)$ равно значению второй производной от корреляционной функции этого процесса с обратным знаком при нулевом значении аргумента, поэтому $\sigma^2[h'(e_0)] = -k''_{h_0}(0)$. Тогда нижнее значение дисперсии оценки параметра e можно получить, если допустить, что фильтр приёмника согласован с сигналом. В этом случае нормированная автокорреляционная функция шума на выходе фильтра совпадает с нормированной автокорреляционной функцией принимаемого сигнала на его входе [131], отсюда следует

$$\sigma^2[h'(e_0)] = -k''_0(0) \quad (4.19)$$

Учитывая, что

$$[S''(e_0)]^2 = q_0^2 \cdot [k''_0(0)]^2 \quad (4.20)$$

и произведя подстановку (19) и (20) в (18), получим дисперсию оценки:

$$\sigma^2(e) = -\frac{1}{q_0 \cdot k''_0(0)} \quad (4.21)$$

Физический смысл соотношения (21) отображает связь дисперсии оценки, соотношения сигнал-шум q_0 и параметра «узости» автокорреляционной функции $k''_0(0)$ сигнала. Если увеличение соотношения сигнал-шум q_0 определяет величину дисперсии, а, следовательно, и вероятность ошибки в принятии решений на данном этапе идентификации согласно

$$P_{ош} = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma(e)} \int_{-\infty}^n \exp \frac{(e - e_0)^2}{2 \cdot \sigma^2(e)} de, \quad (4.22)$$

то учесть влияние свойств автокорреляционной функции принимаемого сигнала на достоверность принимаемых решений невозможно, так как никакой априорной информации об этих свойствах нет.

Рассмотренное выше справедливо для случая действия помех в виде гауссова шума. В роли таких помех могут выступать собственные шумы аппаратуры, космические шумы, шумы атмосферы и др. Если на входе пассивной системы радиолокации действуют помехи с другим распределением, например, целенаправленно создаваемые, то формальные алгоритмы принятия

решений, на основе приведенных выше соображений, оказываются малоэффективными. Необходим учет большого количества признаков сигнала и учет свойств реальных помех. Привлечение интеллектуального ресурса человека-оператора может во многих случаях облегчить задачу принятия решения.

Задачи принятия решений на последующих этапах идентификации объекта (с 3 по 5) ещё более сложны и труднее поддаются формализации, поэтому привлечение оператора наряду с использованием баз данных и баз знаний ещё более оправдано. Однако, следует учитывать ограниченные возможности человека в составе человеко-машинных систем обработки информации. Так количество признаков, которое способен принять человек при идентификации объекта не превышает (7 ± 2) [132]. Необходимое время идентификации для взаимосвязанных символов (слов, фраз) равно 85 мс на символ. Оно зависит от ряда факторов, в том числе для: аналоговых измерений – от класса F ошибки измерительного прибора; последовательности букв – от общего количества букв фразы N_B ; дискретных измеренных величин – от количества десятичных разрядов N_Z .

Для указанных случаев получены следующие величины необходимого времени идентификации:

- для аналоговых приборов $t_{ia} = 0,1ld\left(\frac{50}{F} + 1\right)$ [с], где ld - динамический логарифм по основанию 2;

- для цифровых индикаторов $t_{iz} = 0,061(1 + 3,33N_z)$ [с], при $N_z \geq 1$, при $N_z = 0$,
 $t_{iz} = 0$

- для буквенной информации $t_{ib} = 0,1(1 + 1,25N_B)$ [с], при $N_B \geq 1$, при $N_B = 0$,
 $t_{ib} = 0$.

В соответствии с вышеприведенными формулами, рассчитаны приемлемые для человека-оператора значения предельной скорости поступления информации в зависимости от формы её представления для:

связного текста – 19,3 бит/с; последовательности букв – 22,4 бит/с ($N_z = 4$); аналоговых измеренных величин, считываемых с показывающих приборов при чередующихся замерах – 9,3 бит/с ($F = 2,5$).

Максимальное значение скорости поступления смешанной (буквенно-цифровой) информации человеку-оператору определяется формулой:

$$J_{ms_i} = 11,75 \frac{N_B + 0,7N_Z}{1 + 0,4N_B + 0,15N_Z} \text{ [бит/с]}, \quad (N_z \neq 0, N_B \neq 0) \quad (4.23)$$

Минимальное время идентификации сообщения, характеризующего объект, составляет

$$t_i = 0,4(1 + 0,4N_B + 0,15N_Z) \text{ [с]} \quad (4.24)$$

Из вышперечисленного следует, что реальные возможности человека-оператора в составе системы идентификации ограничены как числом признаков, так и скоростью поступления этих признаков на обработку.

Существенным ограничением является также ограничение на время идентификации объекта по совокупности признаков, а также существенное ухудшение качества идентификации при сбоях в работе технических средств системы, в том числе вызванных действием помех и перегрузками информативных каналов системы. Все это указывает как на необходимость усовершенствования структуры средств идентификации в составе специализированных информационно-измерительных систем пассивного радиомониторинга, так и на усовершенствование алгоритмов их функционирования с тем, чтобы максимальное число задач многоэтапной идентификации решалось с минимальным участием человека-оператора.

Выводы по четвертому разделу

1. Определена и обоснована структура, состав и принципы взаимодействия блоков программного обеспечения многопозиционного пассивного комплекса.
2. Представлены конкретные математические соотношения, используемые при написании алгоритмов для определения координат ИРИ на основе разработанных методов и моделей.
3. Разработаны алгоритмы определения координат ИРИ, основанные на использовании избыточной информации о местоположении цели.
4. Рассмотрены подходы принятия решений при идентификации ИРИ по параметрам формируемых ими излучений.

ВЫВОДЫ

В диссертационной работе решена актуальная задача повышения точности определения координат ИРИ интегрированными многопозиционными комплексами радиомониторинга.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы сводятся к следующему:

1. Разработан метод определения координат ИРИ, который основан на решении системы нелинейных уравнений, описывающих погрешности измерений по критерию наименьших квадратов. Такой метод позволяет учесть погрешность измерения задержки времени прихода сигнала на каждую из станций отдельно за счет введения весовых коэффициентов.

2. В разработанных методах совместной обработки информации от КПРМ и высотомера, а также от КПРМ и активной РЛС, определение координат ИРИ происходит путем решения переопределенной системы нелинейных уравнений, описывающей погрешности измерений по критерию наименьших квадратов.

3. В результате проведенного анализа совместной работы КПРМ со средствами активного радиомониторинга: высотомером и активной РЛС с использованием метода статистических испытаний Монте-Карло установлено, что информационная избыточность повышает точность определения координат ИРИ на 50% -60%.

4. Усовершенствованный метод определения координат ИРИ на основе модификации метода Ньютона позволяет значительно уменьшить время расчета координат ИРИ при несущественном ухудшении точности расчета, что является важным при большом количестве ИРИ.

5. Разработана и исследована методика, позволяющая компенсировать высокую погрешность измерения задержки времени прихода сигнала каждой из станций КПРМ в отдельности за счет введения соответствующих коэффициентов для составляющих квадратичного функционала.

6. Разработанный с помощью теории параметрической чувствительности способ определения станции, которая вносит наибольшую погрешность, позволяет исключить ее из расчетов в случае, если одна из координат ИРИ остается неизменной.

7. Рассмотрены рекомендации по внедрению и использованию разработанных методов в составе интегрированного комплекса радиомониторинга. Подробно рассмотрена структура и алгоритмы управления интегрированным комплексом.

Результаты диссертационных исследований были внедрены в комплекс пассивной локации производства ПАО «Топаз».

Список использованных источников

1. Черняк В. С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993.
2. Основы теории радиоэлектронной борьбы / Под ред. Н. Ф. Николенко – М.: Воениздат, 1987.
3. Сиверс А. П., Суслов Н. А. Основы радиолокации. – М.: Сов.радио, 1956.
4. Радиолокационные станции воздушной разведки / Под. ред. Г. С. Кондратенко. – М.: Воениздат, 1983.
5. Аверьянов В. Я. Разнесенные радиолокационные станции и системы. – Минск: Наука и техника, 1978.
6. Долуханов М. П. Распространение радиоволн. – М.: Связь, 1972.
7. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи / Сост. Д. Р. Ж. Уайт: Пер. с англ. 1971-1973. Вып. № 1. Общие вопросы электромагнитной совместимости. Межсистемные помехи / Под ред. А.И. Саприга. / М.: Сов. Радио, 1972.
8. Хорев. А. А. Теоретические основы оценки возможностей технических средств разведки . – М.: МО РФ, 2000.
9. Фигуровский Д. О совершенствовании системы наблюдения за воздушным пространством в НАТО // Зарубеж. воен. обозрение. 1988. № 8.
10. Павлов В., Гришулин С. Радиолокационные станции, использующие принцип разнесенного приёма / Зарубеж. воен. обозрение. 1988. № 8.
11. Фиолентов А. Новые технические системы разведки воздушных целей // Зарубеж. воен. обозрение. 2000. № 4.
12. Скольник Р. М. Справочник по радиолокации. В 4-х т.: Пер. с англ. М.: Сов. Радио, 1976.
13. Николаев А. Г., Перцов С. В. Радиолокация. – М.: Воениздат, 1970.
14. Боков А. Использование миллиметрового диапазона в авиационных радиоэлектронных системах // Зарубеж. воен. обозрение. 1985. № 9.
15. Боков А. Использование миллиметрового диапазона в авиационных

- радиоэлектронных системах // Зарубеж. воен. обозрение. 1985. № 9.
16. Физический энциклопедический словарь. – М.: Сов. Энциклопедия, 1983.
 17. Ярочкин В. А. Технические каналы утечки информации. – М.: Сов. Энциклопедия, 1983.
 18. Вакин С. А., Шустов Л.Н. Основы радиопротиводействия и радиотехнической разведки. – М.: Сов. Радио, 1968.
 19. Палий А.И. Радиоэлектронная борьба. – М.: Воениздат, 1974.
 20. Царьков Н. М. Многоканальные радиолокационные измерители. – М.: Советское Радио, 1982.
 21. Южаков В. В. Современные методы определения местоположения источников радиоизлучения. – Зарубежная радиоэлектроника, 1987, № 8.
 22. Вартанесян В. А. Радиоэлектронная разведка. – М.: Воениздат, 1991.
 23. Радзиевский В. Г., Сирота А. А., Борисов А. А. Оценка координат источников излучения в мнопозиционных системах при наличии смешанного потока сигналов и помех. – Радиотехника, 1996, № 6.
 24. Мельников Ю. П., Попов С. В. Методы оценки погрешностей параметров движения объекта при его активной и пассивной локации в условиях РЭП. – Радиотехника, 1998, № 3.
 25. Канащенков А. И., Меркулов В. И., Самарин О. Ф. Облик перспективных радиолокационных систем. Возможности и ограничения. – М.: ИПРЖР, 2002.
 26. Справочник по радиолокации, т. 4, под ред. Сколник М. – М.: Советское радио, 1978.
 27. Черняк В. С., Заславский Л. П., Осипов А. В. Мнопозиционные радиолокационные станции и системы. – Зарубежная радиоэлектроника. 1983, № 1.
 28. Финкельштейн М. И. Основы радиолокации. – М.: Радио и связь, 1978.
 29. Радзиевский В. Г., Борисов О. В., Голоскокова Л. Ш. Эффективность определения местоположения источников радиоизлучения на фоне помех. – Радиотехника 2001, № 9 (Радиосистемы, вып. 52.

- Информационный конфликт в спектре электромагнитных волн).
30. Ягольников С. В. Разностный метод определения координат ЛА по сигналам их высотомеров одним бортовым средством разведки. – Радиотехника, 1997, № 5.
 31. Dorato P. On Sensitivity in Optimal Control Systems. IEEE Trans. on Automatic Control, 1963, vol. AC-8, July.
 32. Пагурек Б. Чувствительность оптимальных систем регулирования к изменениям параметров объекта. В сб. «Чувствительность автоматических систем». Изд-во «Наука», 1968, стр. 209 – 216.
 33. Rohrer R. A., Sobrar M. Sensitivity Considerations in Optimal System Design. IEEE Trans. 1965, vol. AC-10, Jan.
 34. Perkins W. R., Cruz Jr., Gonzales R. L. Design of Minimum Sensitivity Systems. IEEE Trans. on Automatic Control, 1968, vol. AC-13, №2, April.
 35. Salmon D. M. Minimax Controller Design. IEEE Trans. on Automatic Control, 1968, vol. AC-13, Aug.
 36. Kokotovic P., Cruz J. B. Jr., Heller J. E. and Sannuti P. Synthesis of Optimally Sensitive Systems. Proc. IEEE, 1968, vol. 56, № 8.
 37. Макухина Т. П., Миленский А. В., Натальченко О. С., Попов С. В. Оценка текущих координат движущегося объекта по данным его пеленгования. – Вопросы радиоэлектроники, серия АСУПР, 1992, вып. 2.
 38. Sobral M. Sensitivity in Optimal Systems. Proc. IEEE, 1968, vol. 56, № 10, Oct.
 39. Pearson J. B. Compensator Design for Dynamic Optimization. International Journal of Control, 1969, vol. 9, № 4.
 40. Luenberger D. G. Observer for Multivariable Systems. IEEE Trans. On Automatic Control, 1966, vol. AC-11, Apr.
 41. Ciric V. Design of Minimum Sensitivity Control Systems. Ph. D. Thesis, Rice University, Houston, Texas, 1969.
 42. Сайбель А.Г. Основы теории точности радиотехнических методов местоопределения. – М.: Оборонгиз, 1958.

43. Калман Р. Когда линейная система управления является оптимальной. Труды американского общества инженеров-механиков. Сер. Д. «Теоретические основы инженерных расчетов», изд-во «Мир», 1964, № 1.
44. Ciric V., Leeds J. V. Sensitivity Consideration of Multiple Input Compensator Design for Dynamic Optimization. Proc. of 6-th Allerton Conf. on Circuits and Systems Theory. University of Illinois, Urbana, Illinois, 1968.
45. Ciric V., Leeds J. V., Design of Minimum Sensitivity Control Systems. Joint Automatic Control Conference, Boulder. Colorado, 1968.
46. Wonham W. M. On Pole Assignment in Multi – Input Controllable Linear Systems. IEEE Trans., vol. AC-12, № 6, Dec.
47. Medanic J. An Elimination Algorithm for Computation of the Minimax. Proc. of the 6-th Allerton Conf. on Circuits and Systems Theory, University of Illinois, Urbana, Illinois 1968.
48. Томович Р. Общая теория чувствительности / Томович Р. Вукобратович М. – М.: Сов. радио, 1972. – 240 с.
49. Алексеев В. М., Тихомиров В. М., Фомин С. В. Оптимальное управление. – М.: Наука, 1979.
50. Бахвалов Н. С. Численные методы, т.1. – М.: Наука, 1973.
51. Бублик Б. Н., Кириченко Н. Ф. Основы теории управления. – Киев: Вища школа, 1975.
52. Васильев Ф. П. Численные методы решения экстремальных задач. – М.: Наука, 1980.
53. Габасов Р., Кириллова Ф. М. Методы оптимизации. – Минск: Изд-во Белорусского ун-та, 1975.
54. Зубов В. И. Лекции по теории управления. – М.: Наука, 1975.
55. Моисеев Н. Н., Иванилов Ю. П., Столярова Е. М. Методы оптимизации. – М.: Наука, 1978.
56. Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкредидзе Р. В., Мищенко Е. Ф. Математическая теория оптимальных процессов. – М.: Наука, 1976.
57. Пшеничный Б. Н., Данилин Ю. М. Численные методы в экстремальных

- задачах. – М.: Наука, 1975.
58. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1979.
59. Ильин В. А., Позняк Э. Г. Основы математического анализа. – М.: Наука, 1971, ч. 1; 1973, ч. 2.
60. Ильин В. А., Садовничий В. А., Сендов Бл. Х. Математический анализ. – М.: Наука, 1979.
61. Карманов В. Г. Математическое программирование. – М.: Наука, 1975.
62. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. – М.: Наука, 1976.
63. Ляшенко И. Н., Карагодова Е. А., Черникова Н. В., Шор Н. З. Линейное и нелинейное программирование. – Киев: Вища школа, 1975.
64. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Вентцель Е. С. – М.: Физматгиз, 1958. – 464 с.
65. Гребенюк А. С. Обработка траекторных измерений в многопозиционном радиолокационном комплексе / Гребенюк А. С. // Материалы всероссийской молодежной научной конференции «VI Королёвские чтения». Секция радиотехники и радиотехнических устройств, том 2, 2001. – 614 с.
66. Ворочилин В. В., Слукин Г. П., Федоров И. Б. Синтез алгоритмов совместного обнаружения – оценивания траекторий движущихся объектов на основе теории случайных потоков // Труды МВТУ им. Н. Э. Баумана. № 540. 1989.
67. Грогиноки Г. Л. Определение положения цели методом одновременного измерения дальности / Грогиноки Г. Л. // «Зарубежная радиоэлектроника», №6, 1960. – 139 с.
68. Гутер Р. С. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта / Гутер Р. С., Овчинский Б. В. – М.: Наука, 1970. 432 с.
69. Дайлевски Т. Критерии выбора кривых для описания экспериментальных данных / Дайлевски Т. // «Ракетная техника и космонавтика», т. 8, №8,

1970. – 164 с.
70. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента / Джонсон Н., Лион Ф. – К.: Мир, 1980. – 610 с.
71. Жданюк Б. Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений / Жданюк Б. Ф. – М.: Советское радио, 1978. – 384 с.
72. Загускин В. Л. Справочник по численным методам решения уравнений / Загускин В. Л. – М.: Физматгиз, 1960. – 254 с.
73. Радиолокационное измерение дальности, скорости и ускорения / Келли Е. – Зарубежная радиоэлектроника, 1962, №2. – 227с.
74. Колодяжный А. Н. Методы и алгоритмы калибровки математической модели погрешности средств траекторных измерений / Колодяжный А. Н. // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (05.13.18). Санкт-Петербург, 2008.
75. Коростелев А. А. Автоматическое измерение координат / Коростелев А. А. – Коростелев А. А. – М.: Воениздат, 1961. – 174 с.
76. Основы теории обработки радиолокационной информации / Кузьмин С. З. – М.: Сов. Радио, 1974. – 432 с.
77. Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах. – М.: Мир, 1969.
78. Кушнарев П. И. Статистические методы контроля точности траекторных измерительных средств / Кушнарев П. И., Огороднийчук Н. Д., Лакеев А. М. – М.: Физматгиз, 1968. – 317 с.
79. Ланцош К. Практические методы прикладного анализа. Справочное руководство / Пер. с англ. М. З. Кайнера; Под ред. А. М. Лошипца / Ланцош К. – М.: Наука. Гл. Ред. физ.-мат. лит, 1961. – 524 с.
80. Абезгауз Г. Г. и др. Справочник по вероятностным расчетам. – М.: Воениздат, 1966.
81. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Книга 2 / Левин Б. Р. – М.: Сов. Радио, 1968. – 504 с.
82. Леман Э. Л. Проверка статистических гипотез / Леман Э. Л. – К.: Наука,

1964. – 560 с.
83. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений / Линник Ю. В. – М.: Физматгиз, 1962. – 350 с.
84. Махонькин Ю. Е. Автоматизированная обработка результатов измерений при летных испытаниях / Махонькин Ю. Е., Павлова З. А., Фальков А. И., Корачков В. И. – М.: Машиностроение, 1983. – 112 с.
85. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений / Митропольский А. К. – М.: Физматгиз, 1962. – 480 с.
86. Михайлов М. В. История возникновения и развития обобщенных методов и адаптивных алгоритмов обработки траекторной информации / Михайлов М. В., Мотылев К. И., Щербов И. Л. // Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Динаміка наукових досліджень - 2005». Том 25. Історія. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2005. – 92 с.
87. Милохов Ю. Н. Алгоритм объединения информации двух пеленгаторов обзорного типа при наличии помех. – Труды ЦНИИ – 30 МО, 1966, вып. 137 (207).
88. Мотылев К. И. Алгоритм последовательной реализации пространственной и временной избыточности траекторной информации / Мотылев К. И., Михайлов М. В., Паслен В. В. // Тезисы докладов международной молодежной научно-практической конференции «Человек и космос». – Днепропетровск: НЦАОМУ, 2006. – 430 с.
89. Налимов В. В. Теория эксперимента / Налимов В. В. – М.: Наука, 1971. – 171 с.
90. Огороднийчук Н. Д. Алгоритм совместной реализации пространственной и временной избыточности данных внешнетраекторных измерений / Огороднийчук Н. Д., Паслен В. В. // Радиоэлектронное оборудование летательных аппаратов. Вып. 3. – К.: КВВАИУ, 1989. – 118 с.
91. Огороднийчук Н. Д. Использование метода наименьших квадратов для оценки положения объекта с траекторией произвольной формы /

- Огородныйчук Н. Д. // Эффективность обработки информации в системах траекторных измерений. – М.: Машиностроение, 1968. – 242 с.
92. Алешкин А. С., Жуков Д. О. Новый подход к моделированию информационно-вычислительных сетей. / А. С. Алёшкин, Д. О. Жуков // Журнал «Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика», М.: Научтехиздат, 2007, №9, с. 40-50.
93. ISBN 978-5-8459-1639-6, 978-1-43-022455-6; Автор Алекс Макки, Введение в .NET 4.0 и Visual Studio 2010 для профессионалов. И: Вильямс, 2010 г., 1427 стр.
94. ISBN 978-5-8459-1683-9 Автор: Ник Рендольф, Дэвид Гарднер, Майкл Минутилло, Крис Андерсон, Visual Studio 2010 для профессионалов. И: Диалектика, 2011, 1212 стр.
95. Роберт Виейра, Программирование баз данных Microsoft SQL Server 2008. И: Вильямс, 2010, 927 стр.
96. Бортран Кенинг, Программирование на T-SQL. И: Вильямс, 2005, 512 стр.
97. Кендалл Скотт, UML. Основные концепции. И: Вильямс, 2002, 144 стр.
98. Эрик Дж. Нейбург. Проектирование баз данных при помощи UML И: Вильямс, 2002, 288 стр.
99. Павлов А. А. Информационные технологии и алгоритмизация в управлении / А. А. Павлов, С. Ф. Теленик. – К.: Техника, 2002. – 344 с.
100. Дубовой В. М. Применение алгоритмической модели к оптимизации информационно-вычислительных систем в условиях неопределенности / В. М. Дубовой, Е. Д. Никитенко // Вестник винницкого политехнического института. 2005. - № 6. – с. 9-14.
101. Трухаев Р. И. Модели принятия решений в условиях неопределенности / Р. И. Трухаев. – М.: Наука, 1981. – 326 с.
102. Фишберн П. Теория полезности для принятия решений / П. Фишберн. – М.: Наука, 1978. – 420 с.
103. Zadeh L. A. Toward a Perception-Based Theory of Probabilistic Reasoning

- with Imprecise Probabilities / L. A. Zadeh // Journal of Statistical Planning and Inference 105 (2002)/. – P. 234 – 253.
104. Принятие решений в расплывчатых условиях / Р. Беллман, Л. Заде // В кн.: Вопросы анализа и процедуры принятия решений. – М.: Мир, 1976. – С. 172 – 215.
105. Dubois D. Fuzzy Real Algebra: Some Results / D. Dubois, H. Prade // Fuzzy Sets and Systems. – Vol.2. – 1979. P. 327 -348.
106. Кобёрн А. Современные методы описания функциональных требований к системам. М.: «Лори», 2002. – 366 с.
107. Буч Г. Язык UML. Руководство пользователя / Г. Буч, Дж. Рамбо, А. Джекобсон - Пер. с англ. М.: ДМК, 2000. – 322 с.
108. Гамма Э., Хелм Р., Джонсон Р., Влиссидес Дж. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования. – СПб: Питер, 2004. – 366 с.
109. Гради Буч. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений на C++, 2-е изд. / Пер. с англ. – М.: Бином, СПб.: «Невский диалект», 2000. – 560 с., ил.
110. Таненбаум Э. С. Современные операционные системы / Э. С. Таненбаум. – СПб: «Питер», 2002. – 1040 с.
111. Holsapple C. W., Winston J. E. Decision support systems. – New Jersey: Prentice Hall, 2001. – 865 p.
112. Зеленый Д. М. Основы теории информации и оптимального приёма. – Л.:ВМА, 1996. – 370 с.
113. Алёшин Б. С. Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии / Алёшин Б. С., Афонин А. А., Веремеенко К. К., Кошелев Б. В., Плеханов В. Е., Тихонов В. А., Тювин А. В., Федосеев Е. П., Черноморский А. И. – М.: Физматлит, 2006. - 424 с.
114. Бабиченко А. В. Прикладные методы обработки информации и моделирования при проектировании информационно-управляющих комплексов высокоманевренных летательных аппаратов / Бабиченко А.В.

- // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва: МГТУ им. Баумана, 2009.
115. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем / Бусленко Н. П. – М.: Наука, 1978. – 400 с.
116. Горелик А. Л. и др. Селекция и распознавание на основе локационной информации / Под ред. А. Л. Горелика. – М.: Радио и связь, 1990.
117. Амиантов И. Н. Применение методов теории решений к задачам обнаружения сигналов и выделения сигналов из шумов. – М.: изд. ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1958.
118. Андреев А. В., Воронин А. В., Замарин А. И., Медведев В. М., Тараненко П. Г. Обнаружение и анализ сигналов сложной структуры. – М.: Изд. МО РФ, 1996.
119. R. G. Wiley Electronic Intelligence: The Interception of Radar Signals. – Dedham, MA: Artech House, 1985.
120. Шляхин В. М. Влияние помех на информационную производительность радиотехнического поиска и обнаружения целей. Приложение к журналу «Радиотехника», Информационный конфликт в спектре электромагнитных волн, 1994.
121. Партала А. Н., Волков В. В., Стефанович А. В. Методы обработки сигналов в пассивных радиолокационных системах. – Зарубежная радиоэлектроника, 1991, № 6.
122. Радзиевский В. Г., Сирота А. А. Информационное обеспечение радиоэлектронных систем в условиях конфликта. – М.: Радиотехника, 2001.
123. Федоров И. Б. И др. Информационные технологии в радиотехнических системах. / По ред. И. Б. Федорова. – М.: МГТУ им. Бауманна, 2011.
124. Пенин П. И., Филиппов Л. И. Радиотехнические системы передачи информации. М.: Радио и связь, 1984.
125. Радиосистемы передачи информации: Учеб пособие для вузов / В. А. Васин, В. В. Калмыков, Ю. Н. Себекин и др.; Под ред. И. Б. Федорова и

- В. В. Калмыкова. М.: Горячая линия – Телеком, 2005.
126. Шумоподобные сигналы в системах передачи информации / В. Б. Пестряков, В. П. Афанасьев, В. Л. Гурвиц и др.; Под. Ред. В. Б. Пестрякова. М.: Сов. Радио, 1973.
127. Калмыков В. В., Сенин А. И. Основы теории информации: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1992.
128. Колесник В. Д., Полтырев Г. Ш. Курс теории
129. Кузнецов А. А., Сенин А. И. Моделирование радиотехнических систем: Учеб. пособие. В 2-х ч. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000 – 2001. Ч. 1, 2000. Ч. 2, 2001.
130. Тихонов В. И. Оптимальный приём сигналов. М.: Радио и связь, 1983.
131. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1989.
132. Акимов П. С., Сенин А. И., Соленов В. И. Сигналы и их обработка в информационных системах: Учеб. пособие для вузов. М.: Радио и связь, 1994.
133. Черных М. М., Богданов А. В., Буров А. С. и др. Анализ информационных свойств когерентных радиолокационных сигналов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 1999. № 4. С. 16-26.
134. Стратонович Р. Л. Условное распределение коррелированных случайных точек и использование корреляций для оптимального выделения импульсного сигнала из шумов // Изв. АН СССР. Сер. Энергетика и автоматика. 1961. № 2.
135. Ачкасов Ю. С. Приложение теории апостериорного анализа потоков к задаче обнаружения траекторий // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика, 1971. № 5.
136. Пантеев Р.Л. Модифікація методу Ньютона стосовно вирішення координатно-трасових задач пасивними автоматичними комплексами

- супроводження воздушних цілей / Ткаченко В.М., Коротков В.В., Пантєєв Р.Л. // Журнал "Радіотехніка". – 2012. - № 170, С. 157-161.
137. Пантєєв Р.Л. Параметризація задачі визначення координат джерела радіовипромінювання комплексами пасивної радіолокації / Ткаченко В.М., Мануйленко Р.І., Хашан Р.І., Пантєєв Р.Л. // Журнал "Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України". – 2012. - № 3(9), С. 84-88.
138. Пантєєв Р.Л. Дослідження просторово-часових моделей пасивної пеленгації джерела радіовипромінювань / Ткаченко В.М., Мануйленко Р.І., Хашан Т.С., Пантєєв Р.Л. // Журнал «Праці Східно-українського університету». – 2012. - №2, С. 52-59.
139. Пантєєв Р.Л. Використання методів теорії чутливості для оптимізації процедур розрахунку та визначення похибки розрахунку координат пасивними системами радіолокації / Ткаченко В.М., Коротков В.В., Пантєєв Р.Л., Известия юго-западного государственного университета. – 2014. - № 3, С. 35-41.
140. Пантєєв Р.Л. Екстремальна постановка і аналіз задачі визначення координат джерел радіовипромінювання різницево-далекомірним методом / Ткаченко В.М., Коротков В.В., Пантєєв Р.Л. // Журнал «Системи обробки інформації». – 2014. - № 4(120), С. 64-68.
141. Пантєєв Р.Л. Аналіз точності визначення координат джерел радіовипромінювання при сумісній роботі системи пасивної радіолокації та висотоміра / Ткаченко В.М., Коротков В.В., Пантєєв Р.Л. // Журнал «Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил». – 2014. - № 2(39), С. 109-114.
142. Пантєєв Р.Л. Аналіз точності визначення координат джерел радіовипромінювання при сумісній роботі системи пасивної радіолокації та активної радіолокаційної станції / Ткаченко В.М., Коротков В.В., Пантєєв Р.Л. // Журнал «Системи обробки інформації», 2014. - № 6(122), С. 90-95.

143. R.L. Pantyeyev UAV detection accuracy and coordinates calculation improvement by means of active and passive radar-location systems / V.M. Sineglazov, R.L. Pantyeyev, V.N. Tkachenko // IEEE International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD). - Kyiv, 2015. – pp. 206 – 209.
144. R.L. Pantyeyev Special features of the passive and active radar systems multiplexing / V.M. Sineglazov, R.L. Pantyeyev, V.N. Tkachenko // Electronics and Control Systems, 2015. - №3(45), С. 33-39.
145. Пантєєв Р.Л. Обробка результатів вимірювань пасивними системами радіолокації для рішення координатно-трасової задачі. / Пантєєв Р.Л. // Збірка тез докладів IV науково-практичної конференції студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування». – Київ, 2011. - С. 39.
146. Пантєєв Р.Л. Аналіз можливості поекземплярного розпізнавання однотипних РЛС для багатопозиційних пасивних систем моніторингу повітряного простору / Поздняков Є.К., Пантєєв Р.Л., Коротков В.В., Ткаченко В.М. // 4-й Міжнародний Радіоелектронний Форум «Прикладна радіоелектроніка. Стан та перспективи розвитку» (МРФ-2011). Конференція «Інтегровані інформаційні радіоелектронні системи і технології». – Харків, 2011. – Т.1, Ч.2. – С.158-161.
147. Пантєєв Р.Л. Розробка алгоритму рішення координатно-трасової задачі для багатопозиційних пасивних систем моніторингу повітряного простору / Поздняков Є.К., Пантєєв Р.Л., Коротков В.В., Ткаченко В.М. // 4-й Міжнародний Радіоелектронний Форум «Прикладна радіоелектроніка. Стан та перспективи розвитку» (МРФ-2011). Конференція «Інтегровані інформаційні радіоелектронні системи і технології». – Харків, 2011. – Т.1, Ч.2. – С.198-200.
148. Пантєєв Р.Л. Алгоритм розрахунку координат цілі на основі вимірювання періоду обертання антенно-фідерної системи радіолокаційної станції / Поздняков Є.К., Пантєєв Р.Л., Коротков В.В., Ткаченко В.М. // Матеріали 16-го міжнародного молодіжного форуму

- «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті». - Харків, 2012. - Т. 3. - С. 134-135.
149. Пантєєв Р.Л. Використання функцій чутливості при оцінці похибки вимірювання координат різницево-далекомірним методом / Поздняков Є.К., Пантєєв Р.Л., Коротков В.В., Ткаченко В.М. // Збірка статей VI Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів, студентів «Сучасна інформаційна Україна: інформатика, економіка, філософія». – Донецьк, 2012. – С. 274-278.
150. Пантєєв Р.Л. Модифікований метод Ньютона для рішення координатно-трасової задачі на основі різницево-далекомірного методу в системах пасивної радіолокації / Пантєєв Р.Л., Поздняков Є.К., Коротков В.В., Ткаченко В.М. // Матеріали XIX Міжнародної конференції з автоматичного управління "АВТОМАТИКА/AUTOMATICS - 2012". – Київ, 2012. - С. 427-428.
151. Пантєєв Р.Л. Використання коефіцієнтів чутливості для визначення точності розрахунку координат пасивними системами радіолокації / Пантєєв Р.Л., Ткаченко В. Н., Коротков В. В. // Збірка статей 22-ї кримської конференції «НВЧ-техніка та телекомунікаційні технології». – Севастополь, 2012. – С. 1027 – 1028.

Приложение А
Документы, которые подтверждают результаты внедрения

«Утверждаю»
Председатель правления ПАО «СКБ РТУ»
Н. М. Гришко
„___” _____ 2014 года



А К Т

о внедрении результатов диссертационных исследований
Пантеева Романа Леонидовича

Комиссия в составе:

Председатель: Коротков В. В., главный инженер ПАО «СКБ РТУ», к.т.н.

Члены: Марченко В. В., зам. пред. правления ПАО «СКБ РТУ», к.т.н.

Карнаух В. В., начальник НИО-3 ПАО «СКБ РТУ», к.т.н.

Рассмотрела:

Результаты диссертационных исследований аспиранта Института прикладной математики и механики НАНУ Пантеева Романа Леонидовича, (научный руководитель: проф., д.т.н. Ткаченко Валерий Николаевич), которые были выполнены в соответствии с планом госбюджетных научно-исследовательских работ по следующим темам: № 0105U000266 «Алгебраические, комбинаторные, логические и эволюционные методы исследования дискретных и непрерывных систем и их использования в задачах идентификации и управления» и № 0114U002024 "Разработка современных аналитических и численных методов анализа и синтеза дискретных и непрерывных динамических систем".

Установила:

Основные теоретические и практические результаты диссертационных исследований Пантеева Р.Л., а именно:

- уменьшение объема вычислительных операций при численном решении систем нелинейных дифференциальных уравнений методом Ньютона, описывающих разностно-дальномерный метод (РДМ) нахождения координат источников радиоизлучения (ИРИ), за счет однократно рассчитанной матрицы Якоби без ухудшения скорости сходимости и точности решения;

- использование параметрической чувствительности для оценки влияния погрешности измерения времени задержки прихода сигнала, вносимой каждой из станций комплекса пассивной радиолокации на точность измерения координат ИРИ и возможности исключения из расчетов одной из станций комплекса в случае, если одна из координат остается неизменной;

- нахождение координат ИРИ методом РДМ на основе экстремальной постановки и компенсация погрешности измерения времени задержки прихода сигнала на отдельные станции комплекса на основе введения весовых коэффициентов перед соответствующими членами квадратичного функционала;

- создание информационной технологии определения координат ИРИ при совместной работе комплексов пассивной и активной радиолокации, с целью снижения СКО ошибки определения координат ИРИ;

были полностью внедрены при разработке программного обеспечения пассивного комплекса дальней радиотехнической разведки «Кольчуга».

Председатель комиссии:

Главный инженер ПАО «СКБ РТУ», к.т.н.

Коротков В. В.



Члены комиссии:

Зам. пред. правления ПАО «СКБ РТУ», к.т.н.

Марченко В. В.



Начальник НИО-3 ПАО «СКБ РТУ», к.т.н.

Карнаух В. В.



Приложение Б

Примеры экранов рабочей программы

The screenshot displays the 'МАНДАТ ЦС' (Mandat CS) software interface. The main window is titled 'МАНДАТ ЦС' and contains several functional areas:

- Top Bar:** Includes tabs for 'Обнаружение', 'Карта', 'Панорама', 'ЧВП', and 'Сервис'.
- Configuration Section:**
 - Тип ИРИ:** Radio buttons for 'ФРЧ' (unchecked) and 'СИЧ' (checked).
 - Порог / поправка, дБ:** Radio buttons for 'задан' (selected) and 'автоматически'.
 - Тип обнаруживаемой СИЧ:** Checkboxes for '3 - 40 мс' and '40 - 250 мс'.
 - Buttons: 'Применить', 'Пуск РД'.
- FRF Table:** A table with columns: Частота, кГц; Ампл., дБ; С/Ш, дБ; Ширина, кГц; Модуляция; К-во эфиров; Т посл.; СТАТУС. Below it are buttons: Пуск, Пропуск, Запрет, Приоритетная, Внеочередная, Подавление.
- Dialog Box:** 'Добавить участок' (Add section) with input fields for 'начальная' (29999.00) and 'конечная' (30000.00) frequencies, and buttons 'Отмена' and 'Добавить'.
- SIK Table:** A table with columns: Фн, кГц; Фк, кГц; Шаг, кГц; Т одной, мс; 1/с; Ампл., дБ; С/Ш ср., дБ; Ширина, кГц; Модуляция; СТАТУС. Below it are buttons: Запрет, Подавление, Пропуск, Координаты.
- Right Panel:**
 - Координаты станции:** Check 'автоматически', input fields for latitude and longitude.
 - Рабочие участки, кГц:** Table with 'начальная' (1500.0) and 'конечная' (14000.0) columns.
 - Запрещённые / Приоритетные:** Table with 'Участки, кГц' and 'Частоты, кГц' tabs, and 'начальная' / 'конечная' columns.
 - Buttons: Координаты, Анализ, подавление БС1, подавление БС2.
- Bottom Section:** A spectrum plot showing frequency from 1500 to 14000 kHz with amplitude from -40 to 80 dB. Two red dots labeled 'БС1' and 'БС2' are visible on the right side of the plot.
- Taskbar:** Shows 'Launch' and 'МАНДАТ ЦС'.
- System Tray:** Includes 'System M...', 'Volume', and 'World View'.

МАНДАТ ЦС

Обнаружение | Карта | **Панорама** | ЧП | Сервис

Начальная частота, кГц: 4700
 Конечная частота, кГц: 6900

Максимум F = 5902
 A = 16

Координаты станции

автоматически

широта: 0 00 00
 долгота: 0 00 00

Рабочие участки, кГц

начальная	конечная
1500.0	14000.0

Запрещённые / Приоритетные

Участки, кГц		Частоты, кГц	
начальная	конечная		

BC1 BC2

● ●

Launch | МАНДАТ ЦС | System M... | Volume | World View | Mon-16 01:31PM

МАНДАТ ЦС

Обнаружение Карта Панорама ЧП Сервис

Координаты станции
 автоматически
 широта 0 00 00
 долгота 0 00 00

Рабочие участки, кГц

начальная	конечная
1500.0	14000.0

Запрещённые Приоритетные

Участки, кГц Частоты, кГц

начальная	конечная
-----------	----------

1500 кГц Шкала времени, мс 5.00 Пороги, дБ 0 -25 Стоп 14000 кГц

80
40
0
-40
1500 14000

BC1 BC2

Launch МАНДАТ ЦС System M... Volume World View

Мандат
 BS1
 BS2
 tech
 Help
 Internet
 Utilities
 File Mana...
 Calculator
 Region View
 Text Editor
 Terminal
 Terminal ...
 Find...
 Image Vie...
 Snapshot
 Games
 Configure

System M...
 Volume
 World View

Mon-16 01:31PM

МАНДАТ ЦС

Обнаружение
Карта
Панорама
ЧВП
Сервис

Усилители, дБ

1.5-2.2	2.2-3.2	3.2-4.7	4.7-6.9	6.9-10	10-14	14-18	18-22	22-26	26-30
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>

Общее

Аттенуаторы, дБ

1.5-2.2	2.2-3.2	3.2-4.7	4.7-6.9	6.9-10	10-14	14-18	18-22	22-26	26-30
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>

Общее

МШУ

1.5-2.2	2.2-3.2	3.2-4.7	4.7-6.9	6.9-10	10-14	14-18	18-22	22-26	26-30
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Общее on/off

Сброс ШРПУ

Пороги ФРЧ

Пороги СИЧ

Координаты станции

автоматически

широта

долгота

Рабочие участки, кГц

начальная	конечная
1500.0	14000.0

Запрещённые **Приоритетные**

Участки, кГц | Частоты, кГц

начальная	конечная

--	--	--	--

BC1 BC2

● ●

80
40
0
-40

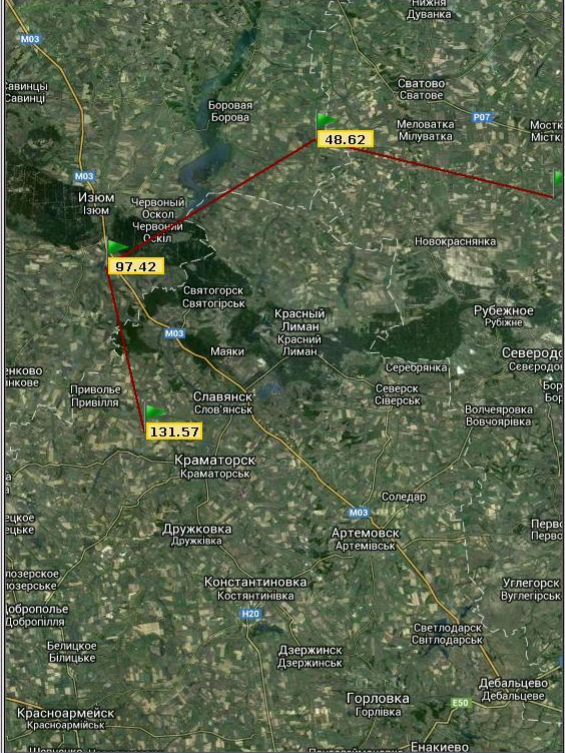
1500
14000

Launch
МАНДАТ ЦС

СР
Mon-16 01:32PM

MANDAT ЦС

Обнаружение Карта Панорама ЧВП Сервис



Координаты станции
 автоматически
широта 0 00 00
долгота 0 00 00

Рабочие участки, кГц

начальная	конечная
1500.0	14000.0

Запрещённые **Приоритетные**

Участки, кГц Частоты, кГц

начальная	конечная
-----------	----------

ФРЧ

№	Время	Широта	Долгота
---	-------	--------	---------

СИЧ

№	Время	Широта	Долгота
---	-------	--------	---------

к
т
а
б
л
и
ц
ы
к

80
40
0
-40
1500 14000

BC1 BC2

Launch МАНДАТ ЦС

System M...
Volume
World View

Mon-16 01:30PM