

На правах рукописи



**АНИКИН АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ**

**МЕТОДЫ УСТРАНЕНИЯ АНОМАЛЬНО БОЛЬШИХ  
ПОГРЕШНОСТЕЙ ПЕЛЕНГОВАНИЯ СКАНИРУЮЩЕГО  
ИСТОЧНИКА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ САНТИМЕТРОВОГО  
ДИАПАЗОНА НА НАЗЕМНЫХ ТРАССАХ**

Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы  
и устройства телевидения

Специальность 05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук**

**Томск – 2013**

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор,  
Денисов Вадим Прокопьевич

**Официальные оппоненты:** Фатеев Юрий Леонидович, доктор технических наук, профессор военной кафедры Военно-инженерного Института Сибирского федерального университета (г. Красноярск).

Семёнов Эдуард Валерьевич, доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектроники и защиты информации Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники

**Ведущая организация:** 3-й Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации, г. Москва.

Защита состоится « 27 » декабря 2013 г. в 9<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д212.268.01 при Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники по адресу: г. Томск, пр-т Ленина, 40, ТУСУР, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» по адресу: г. Томск, ул. Вершинина, 74.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные составителем и заверенные гербовой печатью организации, просим высылать по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ТУСУР, учёному секретарю диссертационного совета Д212.268.01 Филатову А.В.

Автореферат разослан « 25 » ноября 2013 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,  
д. т. н., профессор



Филатов А.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Основным методом определения местоположения источников радиоизлучения (ИРИ) в системах радиотехнической разведки является пеленгационный, основанный на пеленговании ИРИ из разнесённых в пространстве точек. Неизбежные погрешности пеленгования определяют как точность местоопределения источников радиоизлучения на местности, так и возможность пространственной селекции отдельных ИРИ по измеренным пеленгам в сложном радиолокационном поле, характерном для конфликтных ситуаций.

Погрешности пеленгования ИРИ могут быть вызваны: внутренними шумами и неидеальностью приёмной аппаратуры, пространственно-временными искажениями электромагнитного поля из-за влияния трассы распространения.

Постоянное совершенствование электронных компонентов и узлов радиоэлектронной техники позволяет уменьшить коэффициент шума приёмных трактов, ошибки при квантовании принимаемого сигнала, разброс технических характеристик отдельных узлов.

Ошибки пеленгования из-за пространственно-временных искажений электромагнитного поля в месте приёма не могут быть уменьшены за счёт совершенствования аппаратуры, и связаны с пространственно-временной изменчивостью диэлектрической проницаемости тропосферы, отражениями радиоволн от неровностей подстилающей поверхности и местных предметов, дифракцией радиоволн на краях препятствий.

Основные экспериментальные и теоретические работы по определению погрешности пеленгования ИРИ выполнялись с начала пятидесятых годов прошлого столетия для сухопутных и морских трасс прямой видимости, в зоне дифракции и дальнего тропосферного распространения. В частности, такие исследования выполнялись в ТУСУР. Часть исследований связана с изучением статистических характеристик ошибок пеленгования при приёме сигналов от ИРИ со сканирующей антенной. В работах А.В. Меня, С.Я. Брауде, Г.С. Шарыгина, В.П. Денисова, Ю.П. Акулиничева, А.Г. Буймова, Ю.М. Полищука, результаты экспериментальных наблюдений обоснованы теоретически на базе основополагающих работ в области прохождения радиоволн через случайно неоднородные среды (В.И. Татарский, С.М. Рытов), а также работ в области дифракции. Однако экспериментальные материалы были получены с помощью аппаратуры, которая позволяла проводить измерения параметров сигнала, принятого согласованным по полюсе приёмником только по основному и первым боковым лепесткам диаграммы направленности ИРИ.

Анализируемые в данной работе измерения получены с применением приёмника, имеющего полосу, в 6-8 раз превосходящую согласованную, и чувствительность, позволяющую регистрировать дальние боковые лепестки диаграммы направленности антенны ИРИ. Результаты экспериментальных данных свидетельствуют о значительных ошибках пеленгования ИРИ, вызванных многолучёвостью и связанными с ориентацией его антенны. Ошибки

пеленгования, соизмеримые или превосходящие по величине сектор однозначного пеленгования, в данной работе считаются аномальными.

Аномальные ошибки пеленгования приводят к существенному ухудшению точности местоопределения ИРИ со сканирующей антенной, к ухудшению эффективности селекции по измеренным пеленгам отдельных источников радиоизлучения из совокупности, к срыву слежения за целью либо к большим погрешностям наведения на цель и т.д. В связи с этим важной является задача устранения аномальных ошибок пеленгования. Под устранением аномальных ошибок пеленгования понимается исключение пеленгов, измеренных с аномальной ошибкой, из дальнейшей обработки. Дальнейшая обработка предполагает оценивание местоположения ИРИ пеленгационным методом, выполнение пространственной селекции ИРИ по измеренным пеленгам и т.д. В частности, для фазового пеленгатора, устранение аномальных ошибок пеленгования состоит в устранении разности фаз, измеренной с грубой ошибкой. Устранение аномальных ошибок пеленгования выполняется устройством цифровой обработки сигналов, реализующим алгоритм отбраковки измерений пеленга с грубой ошибкой.

Анализом причин и условий возникновения аномальных ошибок пеленгования при приёме сигналов от ИРИ со сканирующей антенной занимались в ЦНИИ-3 МО, ЦНИРТИ. В 2003-2004-х годах эти вопросы решались в НИИ РТС ТУСУР при выполнении НИР «Поле-2» по заказу ЦКБА (г. Омск). Однако, насколько можно судить по доступным автору литературным данным, механизмы возникновения аномальных ошибок пеленгования не были раскрыты настолько детально, чтобы можно было разработать алгоритмы их устранения.

Актуальность работы обусловлена современными требованиями к точности моноимпульсных пеленгаторов при оценивании координат ИРИ пеленгационным методом, пространственной селекции отдельных ИРИ из их совокупности по измеренным пеленгам.

**Современное состояние.** Подходы к устранению аномальных ошибок из результатов пеленгования разработаны применительно к моноимпульсным радиолокационным системам. В частности, работы Ю.И. Щура, Ю.К. Гаврилова, М.А. Богословской, направлены на решение задачи устранения аномальных ошибок, вызванных многолепестковостью диаграмм направленности приёмных антенн, применительно к амплитудному суммарно-разностному моноимпульсному радиолокатору. Под устранением аномальных ошибок пеленгования подразумевается определение, находится ли цель в рабочей зоне углов моноимпульсного радиолокатора или за её пределами. В этих работах рассматриваются такие методы устранения аномальных ошибок пеленгования как метод компенсации с использованием дополнительного приёмного канала, метод сравнения сигналов суммарного и разностного каналов, методы углового стробирования с использованием заранее выявленных информационных признаков.

Отличительные особенности данной работы заключаются в следующем. Во-первых, рассматривается пассивный моноимпульсный радиопеленгатор

(амплитудный или фазовый), определяющий пеленг на ИРИ со сканирующей антенной, а не на пассивную отражающую цель. Во-вторых, устраняются аномальные ошибки пеленгования, объективно существующие при приёме сигналов по главному лепестку диаграмм направленности приёмных антенн. В третьих, в данной работе не используются двумерные пеленгационные характеристики или их крутизна, как это требуется в упомянутых работах.

Кроме указанных методов устранения аномальных ошибок пеленгования имеются работы по устранению грубых измерений из выборки. В этих работах рассматриваются статистические критерии отбраковки грубых измерений, требующие знания статистических характеристик выборки определённого объёма. В диссертационной работе такие критерии не применимы для устранения пеленга из результатов единичных измерений.

Таким образом, для обеспечения современных требований к точности моноимпульсных пеленгаторов при оценивании координат ИРИ со сканирующей антенной пеленгационным методом или при пространственной селекции отдельных ИРИ со сканирующей антенной из их совокупности по измеренным пеленгам, необходимо разработать методы устранения пеленгов, измеренных с аномальной погрешностью, из дальнейшей обработки.

**Научно-техническая задача**, решаемая в диссертационной работе, заключается в разработке методов устранения аномально больших ошибок из результатов моноимпульсного пеленгования источника радиоизлучения со сканирующей антенной на сухопутных трассах. Решение данной задачи имеет существенное значение для совершенствования средств радиотехнической разведки.

**Цель диссертационной работы** – предложить и исследовать методы и алгоритмы устранения аномальных ошибок моноимпульсного пеленгования, основанные на информационных признаках, сопровождающих указанные ошибки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **основные задачи исследования**:

- выявить по экспериментальным данным закономерности возникновения пеленгов с аномальными ошибками в фазовых пеленгаторах на наземных трассах;

- определить математическую модель трассы распространения и принимаемого сигнала, адекватную экспериментальным данным;

- на основе математической модели исследовать условия возникновения аномальных ошибок пеленгования в фазовых и амплитудных пеленгаторах, вызванные интерференцией принимаемых сигналов;

- проверить путём цифрового моделирования процессов на трассе распространения радиоволн (РРВ) правильность выявленных условий возникновения аномальных ошибок;

- определить известные подходы к устранению грубых измерений и оценить их пригодность для устранения аномальных ошибок;

- предложить алгоритмы устранения пеленгов, измеренных с аномальными ошибками.

– проверить предложенные алгоритмы путём цифрового моделирования и на основе экспериментальных данных, полученных на пересечённых наземных трассах.

**Методы исследования.** В ходе диссертационной работы для создания алгоритмов устранения аномальных ошибок пеленгования анализировались экспериментальные данные о фазовых и амплитудных искажениях радиоволн на пересечённых наземных трассах. Поиск условий возникновения аномальных ошибок пеленгования и проверка алгоритмов их устранения выполнялись на теоретических моделях трасс распространения радиоволн.

При решении поставленных задач применялись известные подходы к описанию процессов рассеяния и отражения радиоволн неровностями подстилающей поверхности с учётом направленных свойств антенны ИРИ. Анализ рассеяния радиоволн неровностями подстилающей поверхности основан на подходах, развитых в работах Островитянова Р.В., Басалова Ф.А. «Статистическая теория радиолокации протяжённых целей», в монографии Кулёмина Г. П., Разказовского В.Б. «Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью Земли под малыми углами», в статье Barton D.K. «Low-altitude tracking over rough surfaces». Для учёта отражений радиоволн от местных предметов рассматривался подход, используемый Соломоником М.Е. в книге «Корреляционные ошибки УКВ угломерных систем». В отличие от этих работ, при моделировании учитывался лепестковый характер реальной диаграммы направленности сканирующего источника радиоизлучения, принимались во внимание фазовые соотношения в лепестках.

В диссертационной работе использованы базы экспериментальных данных о пространственно-временных амплитудных, фазовых, поляризационных искажениях сантиметровых радиоволн, полученные в ходе следующих работ:

– «Пространственно-временные модели ультракоротковолновых сигналов, распространяющихся вдоль неровной земной поверхности» в рамках ФЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (2006 – 2008 гг.);

– «Анализ и прогнозирование искажений СВЧ радиоволн и звуковых волн при их распространении в неоднородной тропосфере над неоднородной и неровной земной поверхностью. Экспериментальные исследования» в соответствии с государственным контрактом № 02.740.11.0232. от 07 июля 2009 г.;

– «Развитие учебно-научного радиофизического полигона ТУСУР» по аналитической ведомственной целевой программе «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 гг.)».

Обработка экспериментальных данных выполнялась с помощью современного пакета математического моделирования MatLAB 2012.

**Научная новизна** работы состоит в формулировке условий возникновения аномальных ошибок пеленгования ИРИ со сканирующей антенной и оценке статистических характеристик качества алгоритмов их устранения по экспериментальным данным и путём цифрового моделирования.

**Практическая значимость** диссертационной работы состоит в том, что указаны пути повышения точности и достоверности пеленгования источников радиоизлучения со сканирующими антеннами на наземных трассах путём исключения пеленгов с аномально большими ошибками. Результаты диссертационной работы внедрены в «НИИ «Вектор» г. Санкт-Петербург, о чём свидетельствует акт внедрения. Результаты данной работы применяются в учебном процессе на кафедре радиотехнических систем ТУСУРа.

#### **Научные положения, выносимые на защиту**

1. Ошибки пеленгования источника радиоизлучения, вызванные отражёнными плоскими волнами с заданной суммарной мощностью и равномерно распределёнными по углу в ограниченном интервале слева или справа от направления на источник радиоизлучения, убывают обратно пропорционально количеству отражённых волн, если отношение полезный сигнал/помеха не больше единицы. Для расчёта максимальных ошибок пеленгования источника радиоизлучения достаточно учитывать одну отражённую волну, приходящую под наибольшим углом в рассматриваемом интервале и имеющую суммарную мощность совокупности отражённых волн.
2. Экспериментально наблюдаемые на сухопутных трассах выбросы разности фаз на разнесённых приёмных антеннах, возникающие при изменении углового положения направленной антенны источника радиоизлучения и приводящие к аномальным ошибкам пеленгования, имеют место при интерференции прямой и отражённой от элементов рельефа волн, если амплитуда отражённой волны больше прямой, а разность их углов прихода превышает половину сектора однозначного пеленгования. Такие условия возникают при облучении пеленгатора областью минимума диаграммы направленности источника радиоизлучения.
3. Сочетание известных методов улучшения точности фазовых пеленгаторов, а именно, поляризационно-разнесённого приёма, исключения из обработки в процессе разрешения неоднозначности измерений пеленгов, различие которых на измерительных базах превышает установленный порог, дополненное селекцией пеленгов по отношению амплитуд сигналов на разнесённых антеннах, позволяет с высокой вероятностью устранять аномальные ошибки (в условиях проведения экспериментов до 98 % от общего числа ошибок).

**Достоверность.** Сформулированные в диссертационной работе выводы относительно условий возникновения аномальных ошибок пеленгования основаны на результатах радиофизических экспериментов, проведённых на двадцати наземных трассах в зонах прямой радиовидимости и дифракции. Эффективность предложенных алгоритмов устранения аномальных ошибок пеленгования подтверждена путём проведения полунатурных экспериментов с использованием экспериментальных данных.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы представлены на IV-й общероссийской научно-технической конференции «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем (СВЧ 2012)» (г. Омск, 2012 г.), в сборнике «Доклады ТУСУР» (г.

Томск, 2012 г.), на XVIII-й Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (г. Воронеж, 2012 г.), на научно-технической конференции «Научно-технические проблемы в промышленности: научные, инженерные и производственные проблемы создания технических средств мониторинга электромагнитного поля с использованием инновационных технологий» (г. Санкт-Петербург, 2012 г.), на конференции «International Radar Symposium 2013» (Германия, г. Дрезден, 2013 г.).

**Публикации.** По материалам диссертационной работы опубликовано 12 работ, из них 3 статьи в рецензируемом журнале, 9 – в сборниках докладов международных, всероссийских и региональных конференций.

**Личный вклад.** Автор диссертационной работы лично участвовал в проведении экспериментов в области распространения радиоволн сантиметрового диапазона на пересечённых наземных трассах. Им лично обработаны экспериментальные данные, исследованы условия возникновения аномальных ошибок пеленгования. Автором найдены способы устранения пеленгов, измеренных с аномальной погрешностью, выполнена экспериментальная проверка алгоритмов устранения грубых пеленгов, проведено их сравнение. Автор разработал антенны амплитудного пеленгатора, внедрённые в ОКР по созданию носимой аппаратуры радиомониторинга.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения, приложения и списка литературы. Общий объем работы составляет 184 страницы, содержит 122 рисунка, 16 таблиц. Список литературы включает 144 источника.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, указана научная новизна полученных в работе результатов, отмечена их практическая значимость и представлены научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** «Особенности распространения радиоволн сантиметрового диапазона на сухопутных трассах и их влияние на точность пеленгования» рассмотрены особенности построения обзорных моноимпульсных пеленгаторов в радиотехнической разведке, описаны основные источники погрешностей пеленгования на пересечённых наземных трассах в зоне прямой радиовидимости и в зоне дифракции. На примере двухазового фазового пеленгатора, экспериментально показано существование аномальных ошибок, наблюдаемых при приёме сигналов на сухопутных трассах от ИРИ со сканирующей антенной. Выполнена оценка ошибок пеленгования ИРИ в условиях интерференции совокупности плоских отражённых волн с произвольными амплитудами и углами прихода.

Анализ особенностей построения обзорных моноимпульсных пеленгаторов для радиотехнической разведки показал, что их антенные системы в целях осуществления беспойскового в широком секторе



пеленгования строятся на основе линейных решёток. Важной разновидностью таких систем являются многобазовые фазовые пеленгаторы, применяемые в станциях разведки тактического звена. В носимых средствах разведки используются двухканальные моноимпульсные пеленгаторы с малогабаритными антеннами.

На наземных трассах в пределах зон прямой радиовидимости и дифракции основными причинами ошибок пеленгования являются отражения радиоволн от подстилающей поверхности и местных предметов, а также дифракция радиоволн на препятствиях, какими, в частности, могут быть лесные массивы. Анализ сведений об ошибках пеленгования ИРИ со сканирующей антенной показал, что среднее квадратическое значение ошибки пеленгования в сантиметровом диапазоне длин волн зависит от ориентации антенны ИРИ по отношению к пеленгатору. Отклонение максимума диаграммы направленности антенны ИРИ в сторону от направления на пеленгатор приводит к возрастанию ошибок пеленгования.

Экспериментальные данные, полученные в сантиметровом диапазоне на наземных трассах протяжённостью до 30 км при приёме сигналов от РЛС со сканирующей антенной, излучающей простой радиоимпульс длительностью 300 нс, свидетельствуют о наличии интервалов угловых положений антенны ИРИ, в которых наблюдаются двухполярные броски разности фаз на разнесённых приёмных антеннах размахом до  $2\pi$  радиан (рисунок 1).

Двухполярные броски разности фаз соответствуют наибольшим ошибкам при пеленговании ИРИ фазовым методом. Анализ доступной литературы показал, что отсутствуют сведения об условиях возникновения аномальных ошибок, необходимые для построения алгоритмов их устранения.

Зависимость амплитуды сигнала, принятого антенной пеленгатора на сухопутной наземной трассе, от углового положения антенны ИРИ называется в работе «кажущейся» диаграммой направленности (КДНА).

Цифровое моделирование процесса пеленгования ИРИ в условиях интерференции совокупности плоских отражённых волн с произвольными амплитудами и углами прихода показало, что ошибки пеленгования источника радиоизлучения, вызванные отражёнными плоскими волнами с заданной суммарной мощностью и равномерно распределёнными по углу в ограниченном интервале слева или справа от направления на источник радиоизлучения, убывают обратно пропорционально количеству отражённых волн, если отношение полезный сигнал/помеха не больше единицы. Для расчёта максимальных ошибок пеленгования  $\Delta\alpha^{\max}$  источника радиоизлучения достаточно учитывать одну отражённую волну, приходящую под наибольшим углом в рассматриваемом интервале и имеющую суммарную мощность совокупности отражённых волн (рисунок 2).

Зависимость ошибки пеленгования ИРИ от количества  $N$  отражённых плоских волн, приходящих слева или справа от него, описывается выражением:

$$\Delta\alpha = \arcsin \left[ -\frac{U_s \sin(\Delta\nu)}{2(U_s - 1)} (1 + N^{-1}) \right],$$

где  $U_s$  – отношение амплитуды прямого к суммарной амплитуде совокупности отражённых волн,  $\Delta\nu$  – сектор углов прихода отражённых сигналов (радианы).

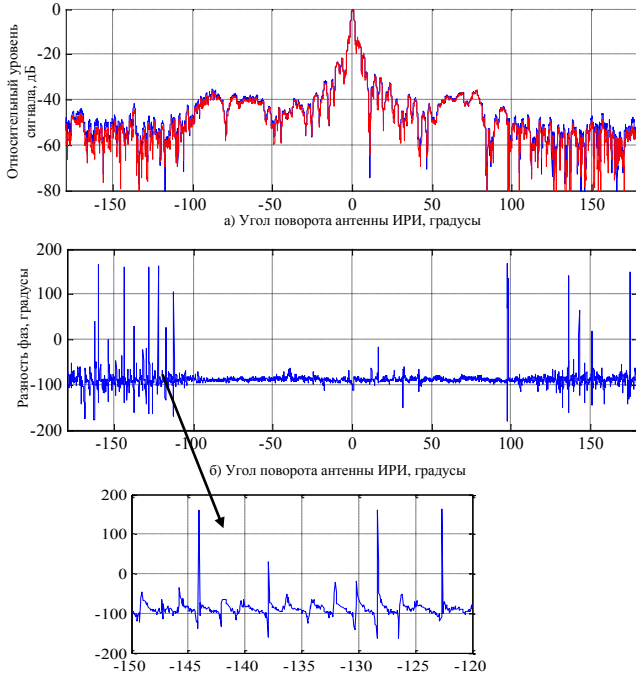


Рисунок 1 – Зависимости амплитуд сигналов, принятых пространственно-разнесёнными антеннами а); разности фаз между ними б) от углового положения антенны ИРИ, сухопутная открытая трасса протяжённостью 16,7 км, база  $6\lambda$

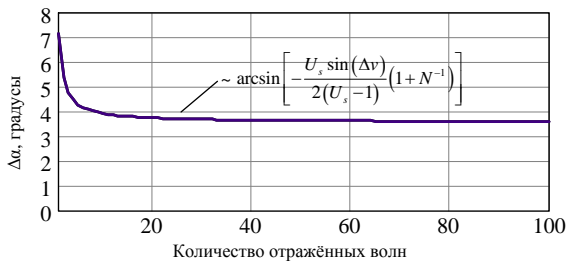


Рисунок 2 – Зависимость максимальной ошибки пеленгования от количества отражённых волн, принимаемых в секторе  $\Delta\nu = 0,5$  радиан, при  $U_s = 0,2$

Во **второй** главе «Исследование условий возникновения аномальных ошибок пеленгования в фазовых пеленгаторах на наземных трассах при приёме сигналов от ИРИ со сканирующей антенной» анализировались аномальные ошибки пеленгования в фазовых пеленгаторах, возникающие

вследствие двухполярных бросков разности фаз на разнесённых антеннах, имеющих место при изменении углового положения антенны ИРИ. На основе представленных экспериментальных данных получены общие закономерности, связанные с двухполярными бросками разности фаз и составлены адекватные этим броскам модели наземных трасс распространения радиоволн. При помощи моделирования процессов на трассе распространения радиоволн найдены условия возникновения двухполярных бросков разности фаз, и показано качественное сходство моделируемых и экспериментальных зависимостей разности фаз на разнесённых антеннах от углового положения антенны ИРИ (сравни. рисунки 1 и 3).

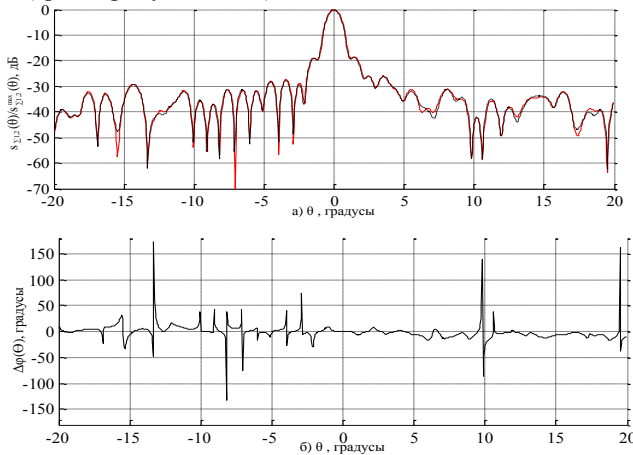


Рисунок 3 – КДНА РЛС и зависимость разности фаз между сигналами приёмных антенн от углового положения антенны ИРИ для модели трассы, имитирующей рассеяние радиоволн подстилающей поверхностью

Аномальные ошибки пеленгования наблюдаются в условиях интерференции прямого сигнала и приходящего под определённым углом отражённого сигнала, когда амплитуда прямого сигнала меньше или соизмерима с амплитудой рассеянного сигнала. При изменении отношения амплитуд прямого и отражённого сигналов  $R$  имеют место два механизма возникновения двухполярных бросков разности фаз размахом  $2\pi$  при приёме сигналов на пространственно-разнесённые антенны. Первый механизм наблюдается при приёме отражённой плоской волны из-за пределов сектора однозначного пеленгования, связанного с пространственным разносом антенн (рисунок 4). Второй механизм наблюдается при приёме отражённой волны от переизлучателя, расположенного в области пространства, в которой номер пространственной зоны Френеля, определённой между ИРИ и одной приёмной антенной, отличается на единицу от номера пространственной зоны Френеля, определённой между ИРИ и другой приёмной антенной. (рисунки 5, 6). В последнем случае, двухполярные броски разности фаз имеют место при любых ненулевых пространственных разносах приёмных антенн.

Аномальные ошибки в фазовых пеленгаторах наблюдаются на трассе распространения с одним отражателем, если его угловое положение, отсчитываемое с позиции пеленгатора от направления на ИРИ (рисунок 6), определяется формулой:

$$\alpha_u = \arctg \left[ \frac{\sqrt{\lambda \left( n - \frac{\varphi_u}{\pi} \right) D_u (D - D_u)}}{\sqrt{D} (D - D_u)} \right],$$

$\varphi_u$  – дополнительный сдвиг фазы мешающего сигнала при переотражении;  
 $n$  – номер зоны Френеля.

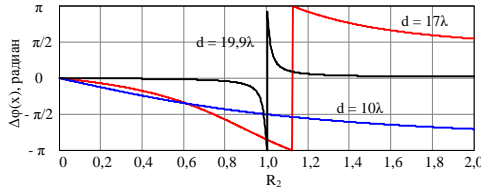


Рисунок 4 – Разность фаз между сигналами на антеннах, пространственно-разнесённых на базу  $d$ , в зависимости от отношения амплитуд прямой и отражённой волны, приходящей под углом  $\nu = 0,05$  радиан,  $\lambda = 0,03$  м

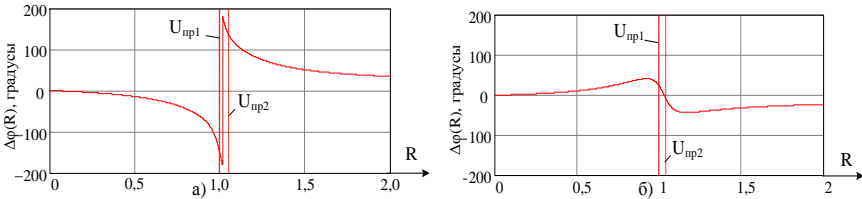


Рисунок 5 – Разность фаз сигналов на пространственно-разнесённых антеннах в зависимости от отношения амплитуды прямой волны к амплитуде отражённой волны. Номера зон Френеля между ИРИ и каждой из приёмных антенн, отличаются на единицу а), не отличаются на единицу б)

Угол прихода плоской мешающей волны  $\alpha_u$  и пространственный разнос между приёмными антеннами  $d$ , при которых наблюдаются аномальные ошибки пеленгования, если амплитуда отражённой волны больше амплитуды прямой ( $R > 1$ ), вычисляется по формуле:

$$\alpha_{u,n} = \left[ \arcsin \left( \frac{\lambda (2n+1)}{d} \left( 1 - \frac{\arccos(1/R)}{\pi} \right) \right), \dots, \arcsin \left( \frac{\lambda (2n+1)}{d} \left( 1 + \frac{\arccos(1/R)}{\pi} \right) \right) \right],$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$

Из формулы следует, что при падении на ось  $OX$  отражённой волны под углом  $\alpha_u$  при измерении разности фаз между точками, разнесёнными на  $d_n$ , аномальная ошибка возникнет, если амплитуда мешающего сигнала больше амплитуды прямой ( $R > 1$ ).

Аномальные ошибки пеленгования не возникают, если при падении мешающей волны под углом  $\alpha_u$  расстояние между антеннами не превышает:

$$d_n < \lambda \pi / 2 \sin(\alpha_u)$$

В главе 2 показано, что при изменении отношения амплитуд прямого и отражённого сигналов вследствие сканирования антенны ИРИ разность фаз на разнесённых антеннах в области двухполярного броска описывается функцией вида  $\Delta\varphi(R) \sim \arctg\{1/[R - 1]\}$ .

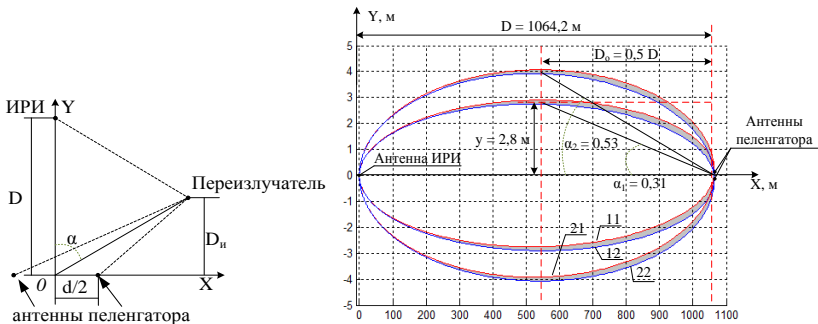


Рисунок 6 – Геометрические соотношения на трассе распространения с одним отражателем

При наличии anomalно больших ошибок пеленгования, имеющих место в минимумах КДНА ИРИ, могут заметно различаться:

- измеренные пеленги, пересчитанные из разности фаз для различных баз фазового пеленгатора;
- амплитуды сигналов на разнесённых антеннах.

Anomalные ошибки пеленгования в фазовых пеленгаторах с поляризационно-разнесёнными приёмными антеннами могут наблюдаться в различных угловых положениях антенны ИРИ.

В третьей главе «Погрешности пеленгования ИРИ амплитудными пеленгаторами» рассматриваются anomalные ошибки амплитудного логарифмического моноимпульсного пеленгатора с малогабаритными спиральными антеннами. В связи с отсутствием малогабаритных антенн для исследования anomalных ошибок в амплитудном пеленгаторе, возникла необходимость в их разработке. В главе 3 приведены результаты проектирования и испытания малогабаритных антенн, пригодных для применения в амплитудном моноимпульсном пеленгаторе аппаратуры радиотехнической разведки.

Анализ существующих образцов антенн показал, что подходящим прототипом для проектирования малогабаритной антенны амплитудного моноимпульсного пеленгатора является плоская спиральная антенна.

Спроектированные и испытанные спиральные антенны обеспечивают направленный приём, имеют широкие (порядка 80 градусов) и гладкие диаграммы направленности, что удовлетворяет требованиям к антеннам моноимпульсного амплитудного пеленгатора. При измерениях ДНА спиральных антенн в полевых условиях или на трассах прямой видимости и дифракции наблюдается их изрезанность, которая может приводить к заметному искажению линейного участка пеленгационной характеристики и снижению точности пеленгования.

В результате анализа ошибок амплитудного моноимпульсного пеленгатора при приёме сигналов на сухопутных трассах по основному лепестку ДНА ИРИ получено, что значительной является систематическая погрешность, проявляющаяся как смещение нуля пеленгационной характеристики, достигающая единиц-десятков градусов.

Показано, что на наземных трассах в сантиметровом диапазоне аномальные ошибки в амплитудных пеленгаторах возможны при приёме сигналов:

- в основном лепестке диаграммы направленности антенны ИРИ при отклонении антенной системы пеленгатора в сторону от ИРИ;
- на равносигнальном направлении по отношению к ИРИ со сканирующей антенной (рисунок 7).

Наблюдаемые в работе амплитудного моноимпульсного пеленгатора аномальные ошибки при приёме сигналов на равносигнальном направлении по отношению к ИРИ со сканирующей антенной могут превышать сектор пеленгования в 1,5-2 раза по результатам экспериментов на сухопутных трассах прямой видимости и в зоне дифракции. Сектор пеленгования определяется как растров линейной части пеленгационной характеристики.

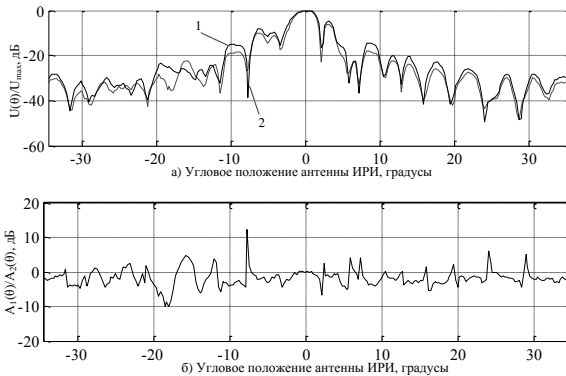


Рисунок 7 – «Кажущиеся» диаграммы направленности антенны ИРИ а), зависимость отношения амплитуд сигналов на выходах разнесённых по углу спиральных антенн от углового положения антенны ИРИ б), трасса протяжённостью 6,8 км

Аномальные ошибки амплитудного моноимпульсного пеленгатора при приёме сигналов по основному лепестку диаграммы направленности антенны ИРИ, наблюдаемые при отклонении его антенной системы от направления на ИРИ, достигают на сухопутных трассах одной трети ширины диаграммы направленности приёмной антенны, а при приёме сигналов от ИРИ со сканирующей антенной на равносигнальном направлении соизмеримы с шириной диаграммы направленности.

В четвёртой главе «Алгоритмы устранения аномально больших ошибок в обзорных моноимпульсных пеленгаторах» рассматриваются способы отбраковки грубых измерений и сделана оценка применимости этих способов к устранению аномальных ошибок пеленгования ИРИ со сканирующей

антенной. Найдены подходы к устранению anomalно больших ошибок в амплитудных пеленгаторах и алгоритмы их устранения в фазовых пеленгаторах. Для фазовых моноимпульсных пеленгаторов алгоритмы устранения пеленга с anomalной ошибкой основаны на явлениях, приводящих к возникновению таких ошибок. Найденные алгоритмы устранения anomalных ошибок пеленгования в фазовых пеленгаторах проверены экспериментально на сухопутных наземных трассах при приёме сигналов от РЛС со сканирующей антенной, излучающей радиоимпульс длительностью 300 нс на частоте 9600 МГц.

Анализ существующих статистических критериев отбраковки грубых измерений (например «три сигма», «критерий Романовского», критерий «вариационного размаха» и т.п.) показал их малоприспособленность для устранения anomalных ошибок пеленгования ИРИ со сканирующей антенной. Для применения статистических критериев необходимо знать вероятностные характеристики принятых сигналов для конкретной наземной трассы, которые могут изменяться от углового положения антенны ИРИ.

Алгоритмы устранения из дальнейшей обработки пеленгов, измеренных с anomalными ошибками должны быть применимы для работы по одному принятому импульсу. Рассматривается случай, когда имеется система обнаружения, позволяющая выносить решение о наличии сигналов ИРИ и запоминать оцифрованные отсчёты принятых сигналов в памяти вычислителя для измерения пеленга, а сигналы от ИРИ принимаются в области основного лепестка диаграммы направленности приёмных антенн. Устранение пеленга с anomalной ошибкой выполняется на основе информации об амплитудах импульсных сигналов, принятых на пространственно разнесённые антенны, и разности фаз между ними. Расположение блока исключения пеленга с anomalной ошибкой в обобщённой структурной схеме простейшего двухканального пеленгатора с блоком цифровой обработки сигналов показано на рисунке 8.



Рисунок 8 – Обобщённая структурная схема простейшего пеленгатора с блоком устранения anomalных ошибок пеленгования

Аномальные ошибки пеленгования, вызванные влиянием трассы распространения, в амплитудных пеленгаторах могут быть устранены путём:

– сравнения отношения амплитуд принятых сигналов с пределами линейного участка пеленгационной характеристики; если отношение амплитуд принятых сигналов выходит за эти рамки, пеленг имеет аномальную ошибку и устраняется из дальнейшей обработки;

– сравнения разности пеленгов, измеренных отдельно по отношению амплитуд и разности фаз принятых сигналов, с некоторым порогом; пеленг с аномальной ошибкой устраняется из дальнейшей обработки, если результаты измерений различаются на величину, превышающую установленный порог.

Аномальные ошибки пеленгования, вызванные влиянием трассы распространения, в фазовых пеленгаторах могут быть устранены следующими путями (таблица 1).

– По превышению отношением амплитуд сигналов, принятых на разнесённые антенны, фиксированного порога. Вероятность устранения аномальных ошибок  $P_y$  по результатам моделирования и эксперимента приблизительно одинакова и равна примерно 80 % (таблица 1, алгоритм №1).

– По различию пеленгов, полученных на разных фазометрических базах, на величину, превышающую заданный порог. Вероятность устранения аномальных ошибок с надёжностью 0,95 укладывается в доверительный интервал от 54% до 65 %, если пороговое значение равно 0,2 (таблица 1, алгоритм №2).

– Путём суммирования разностей фаз сигналов ортогонально поляризованных по приёму антенн с весами, зависящими от модуля поляризационного отношения. Вероятность устранения аномальных ошибок  $P_y$  по результатам эксперимента с надёжностью 0,95 укладывается в доверительный интервал от 79 % до 87 % (таблица 1, алгоритм № 3).

– По различию отношений амплитуд сигналов ортогонально поляризованных по приёму антенн на величину, превышающую установленный порог. Если отношение амплитуд сигналов на пространственно-разнесённых антеннах, образующих одинаковые фазометрические базы с ортогональной поляризацией приёма, приблизительно одинаковы, то пеленг вычисляется как весовая сумма измеренных разностей фаз с весами, зависящими от поляризационного отношения. Вероятность устранения аномальных ошибок  $P_y$  по результатам эксперимента с надёжностью 0,95 укладывается в доверительный интервал от 97 % до 99 % (таблица 1, алгоритм №4).

В результате применения указанных алгоритмов обработки сигналов из результатов измерений могут исключаться не только пеленги с аномальными ошибками, но и измерения, которые таковыми не являются. Такую ситуацию называют «пропуск пеленга». При экспериментальной проверке каждого алгоритма оценивалась вероятность пропуска пеленга  $P_{пр.п.}$  (таблица 1).

Сравнительный анализ разработанных алгоритмов показывает, что наибольшая вероятность устранения аномальных ошибок наблюдается при применении алгоритма №4 («Логарифм отношения амплитуд  $M2$ »). Согласно этому алгоритму пеленг вычисляется по разности фаз, полученной при суммировании с весами, зависящими от модуля поляризационного отношения, разностей фаз сигналов ортогонально поляризованных по приёму антенн, если



различие отношений амплитуд сигналов ортогонально поляризованных по приёму антенн не превышает установленный порог.

Устранение выбросов разности фаз приводит к увеличению достоверности измерения пеленга, а также к возрастанию точности пеленгования, когда погрешность пеленга характеризуется среднеквадратическим значением  $\sigma_\alpha$  по совокупности из  $M$  пеленгов  $\alpha_i$  ( $i = 1..M$ ). В трёхсантиметровом диапазоне длин волн при пространственном разnose приёмных антенн фазового пеленгатора от 6λ до 30λ и наличии 10% выбросов разности фаз, погрешность пеленгования при устранении более 90 % выбросов уменьшается более чем в 2 раза.

Таблица 1 – Вероятность устранения пеленга с аномальной ошибкой и вероятность пропуска пеленга

№	Наименование алгоритма	$P_y, \%$	$P_{пр.п.}, \%$
1	«Логарифм отношения амплитуд»	73 ∈ [67; 77]	0,03
2	«Устранение неоднозначности»	60 ∈ [54; 65]	2,5
3	«Поляризационное отношение»	85 ∈ [79; 88]	-
4	«Логарифм отношения амплитуд M 2»	98 ∈ [97; 99]	0,5

Аномальные ошибки пеленгования устраняются в следующих случаях:

– «Логарифм отношения амплитуд»: если минимумы КДНА ИРИ, измеренной по сигналам на выходах пространственно-разнесённых антенн, наблюдаются в одинаковых угловых положениях антенны ИРИ, а различие амплитуд сигналов превышает заданный порог.

– «Устранение неоднозначности»: если аномальные погрешности наблюдаются одновременно на малой и большой базах, т.е. соответствуют различным угловым положениям антенны ИРИ.

– «Поляризационное отношение»: если минимумы КДНА ИРИ на антеннах с ортогональной поляризацией приёма наблюдаются одновременно, т.е. в разных угловых положениях антенны ИРИ.

– «Логарифм отношения амплитуд M2»: если различие амплитуд сигналов на пространственно-разнесённых приёмных антеннах, превышает заданный порог, либо минимумы «кажущихся» диаграмм направленности антенны ИРИ на различных антеннах соответствуют различным её угловым положениям.

В **заключении** приведены теоретические и практические результаты, полученные автором в диссертационной работе.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1) Проведены экспериментальные исследования фазовых и амплитудных искажений сигналов сантиметрового диапазона, излучённых ИРИ со сканирующей антенной и распространяющихся на пересечённых наземных трассах, и выяснены условия и физические причины аномально больших ошибок фазовых и амплитудных пеленгаторов, связанные с явлениями

отражения и рассеяния радиоволн подстилающей поверхностью и местными предметами.

2) Разработаны адекватные математические модели процессов на трассе распространения, приводящих к аномально большим ошибкам пеленгования, и получены количественное соотношение, связывающее местоположение рассеивающих объектов, а также характеристики рассеянных и прямых сигналов, определяющие условия их возникновения.

3) Показано, что аномальные ошибки амплитудного логарифмического моноимпульсного пеленгатора при приёме сигналов по основному лепестку диаграммы направленности антенны ИРИ, наблюдаемые при отклонении его антенной системы от направления на ИРИ, могут достигать одной трети ширины диаграммы направленности приёмной антенны. При наведении антенной системы амплитудного логарифмического моноимпульсного пеленгатора равносигнальным направлением на ИРИ со сканирующей антенной аномальные ошибки соизмеримы с шириной диаграммы направленности.

4) Разработаны алгоритмы обработки сигналов, позволяющие исключить из результатов пеленгования фазовым методом пеленги с аномально большими ошибками. Алгоритмы проверены по реальным сигналам и показали высокую эффективность (величина устранения аномальных ошибок 0,95-0,97 в условиях эксперимента).

5) Разработана и внедрена в ОКР малогабаритная спиральная антенна для носимой аппаратуры радиомониторинга.

### **Основные публикации по теме диссертации**

1. Аникин А.С. Погрешность пеленгования источника излучения малогабаритными антеннами в условиях мешающих отражений / А.С. Аникин, В.П. Денисов // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР–2011». – Томск: В-Спектр, 2011. – Ч. 1. – С. 9 – 12.
2. Аникин А.С. Корреляционно-интерферометрический метод пеленгования в системах радиомониторинга / А.С. Аникин, А.В. Христенко, А.Л. Дерябин // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР–2008». – Томск: В-Спектр, 2008. – Ч. 5. – С. 46 – 48.
3. Аникин А.С. Применение корреляционно-интерферометрического метода пеленгования в системах радиомониторинга / А.С. Аникин, А.В. Христенко, А.Л. Дерябин // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР–2008». – Томск: В-Спектр, 2008. – Ч. 5. – С. 48 – 51
4. Аникин А.С. Ошибки пеленгования источников радиоизлучения малогабаритными антеннами в условиях отражений от местности / А.С. Аникин, В.П. Денисов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники: периодический научный журнал. – 2012. – №2 (26), Ч. 1. – С. 11 – 20.

5. Аникин А.С. Экспериментальная оценка точности амплитудных малогабаритных радиопеленгаторов сантиметрового диапазона с рупорно-параболическими и спиральными антеннами / А.С. Аникин, В.В. Цугланов, А.А. Мещеряков // *Материалы Международной заочной научно-практической конференции «Наука и техника в современном мире»*. – Новосибирск: Априори, 2011 – С. 54 – 66.
6. Аникин А.С. Экспериментальная оценка точности пеленгаторов с малогабаритными антеннами, находящимися у поверхности земли / А.А. Мещеряков, В.Ю. Куприц, П.И. Кудряшов // *Материалы XV Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь»*. – Воронеж, 2012. – Том 3. – С. 2023 – 2032.
7. Аникин А.С. Анализ зависимости разности фаз на антеннах фазового радиопеленгатора от ориентации направленной антенны источника радиоизлучения в условиях пересечённой местности / А.С. Аникин, В.П. Денисов, М.В. Крутиков, Н.А. Колядин // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. – 2013. – № 2 (28). – С. 5 – 13.
8. Anikin A.S. Simulation of Abnormally Large errors of scanning Ground Radar Location by the Phase Direction Finder / A.S. Anikin, V.P. Denisov, M.V. Mironov // *14th International Radar Symposium (IRS) 2013, Dresden, Germany, June 19 – 21, Proceedings, Vol.1, P. 841 – 847*.
9. Аникин А.С. Цифровое моделирование anomalously больших ошибок пеленгования сканирующей наземной РЛС. / А.С. Аникин, В.П. Денисов // *Материалы IV общероссийской научно-технической конференции «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем – СВЧ 2012»*. – Омск, 2012. – С. 6 – 20.
10. Аникин А.С. Исследование причин anomalously ошибок пеленгования фазовым методом на наземных трассах. / А.С. Аникин, В.П. Денисов // *Материалы XVIII Международной научно-технической конференции «Радиолокация навигация связь»*. – Воронеж, 2012 – Том 3. – С. 2014 – 2023.
11. Аникин А.С. Анализ anomalously ошибок пеленгования фазовым методом на наземных трассах. / А.С. Аникин, В.П. Денисов // *Материалы Научно-технической конференции «Научно-технические проблемы в промышленности: научные, инженерные и производственные проблемы создания технических средств мониторинга электромагнитного поля с использованием инновационных технологий»*. – Санкт-Петербург, 2012. – С. 101 – 108.
12. Аникин А.С. Методика экспериментальной оценки девиации Аллана высокостабильных атомных стандартов с использованием цифрового осциллографа / А.С. Аникин, А.В. Артемов, В.Г. Корниенко, В.Ю. Лебедев // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. – 2013. – №3 (29). – С. 10 – 16.

Тираж 100 экз. Заказ 1135.  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники.  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.  
Тел. (3822) 533018.