На правах рукописи

## ЧУМАНКИН Юрий Евгеньевич

## МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАССИВНЫХ СИСТЕМ МОНОИМПУЛЬСНОЙ ПЕЛЕНГАЦИИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ ПАРАМЕТРОВ АНТЕННЫХ СИСТЕМ

Специальность 1.3.4 – радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород, 2025 г.

Работа выполнена на кафедре информационных технологий в физических исследованиях (ИТФИ) физического факультета ННГУ им. Н.И. Лобачевского и в лаборатории моделирования физических процессов и цифровой обработки данных отдела №14 научно-исследовательского физико-технического института (НИФТИ) ННГУ.

Научный руководитель:	доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой ИТФИ физического факультета <b>Морозов Олег Александрович</b> , ННГУ им. Н.И. Лобачевского
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор, директор института радиоэлектроники и информационных технологий <b>Мякиньков Александр Валерьевич</b> , ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиотехники и радиосистем, <b>Самойлов Сергей Александрович</b> , ФГБОУ ВО «Владимирский государственный
	университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
Ведущая организация:	ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»

Защита состоится <u>«17» декабря</u> 2025 г. в <u>16:30</u> на заседании диссертационного совета 24.2.340.03, созданного на базе Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, по адресу: 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 1, ауд. 420.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте <u>https://diss.unn.ru/1553</u>.

Автореферат разослан «\_\_\_\_» \_\_\_\_ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета д.ф-м.н., доцент

Aly

Клюев А.В.

#### Общая характеристика работы

#### Актуальность темы диссертации

В настоящее время значительный интерес проявляется к разработке систем спутниковой связи, подобных системам Iridium, Thuraya и т.д. Космические аппараты этих систем должны решать множество задач, например, организация сеансов связи с наземными абонентами, поддержание сеансов, организация сеансов связи с использованием других космических аппаратов и т.д. Для лучшего значения отношения сигнал / шум (ОСШ) во время сеанса следует ориентировать антенную систему таким образом, чтобы в направлении пеленга абонента формировался максимум излучения спутниковой антенной системы. Абонент не всегда может определить и сообщить своё местоположение, так как в некоторых случаях доступ к глобальным навигационным системам может быть осложнён. Поэтому среди прочих задач в системах спутниковой связи актуальной является задача пассивной пеленгации источника радиоизлучения (ИРИ). Для решения этой задачи существует множество подходов [1–3], которые развиваются в настоящее время. Распространена ситуация, в которой абонент попадает в область видимости только одного космического аппарата, поэтому в работе предполагается использование данных только с одного космического аппарата.

В условиях космического базирования антенн предпочтительны методы моноимпульсной пеленгации, которые работают в условиях единственной реализации излученного сигнала и не требуют изменения положения антенной системы относительно ИРИ для определения пеленга. Одним из перспективных направлений является использование многолучевых параболических офсетных антенных систем. Для решения задачи пеленгации используются априорно известные диаграммы направленности (ДН) лучей одной многолучевой антенной системы с несколькими каналами приёма. Каждому каналу приёма соответствует луч ДН антенной системы, а направления на главные максимумы ДН лучей различны. Наличие нескольких лучей компенсирует единственность реализации работе рассмотрены излученного сигнала. В амплитудные методы моноимпульсной пеленгации. По зарегистрированным реализациям принятого сигнала в различных лучах антенной системы производится оценка амплитуд сигнала A<sub>i</sub>, которые затем используются совместно с информацией о диаграммах направленности лучей для вычисления пеленга. Исходными данными для задачи определения пеленга являются:

- диаграммы направленности лучей антенной системы;
- амплитуды сигнала  $A_i$ , зарегистрированные в лучах антенной системы.

Как правило задача пеленгации решается для антенных систем и абонентов, расположенных друг от друга на расстоянии от километров до сотен километров. Ошибка определения местоположения прямо пропорциональна расстоянию до абонента и ошибке пеленгации. В случае рассмотрения систем космического базирования расстояние до абонента может составлять тысячи или десятки тысяч километров. В подобной ситуации малейшие ошибки пеленга приводят к значительным ошибкам определения местоположения. Поэтому для успешного функционирования систем космического базирования требуется учёт факторов, которые не принципиальны для наземных систем.

## Степень разработанности темы исследования

Теоретические обоснования базового подхода решения подобных задач разработаны и описаны в работах А.И. Леонова и К.И. Фомичева [1], Я.С. Шифрина [4], Д.Р. Родса [5], Г.З. Айзенберга [6] и других учёных. Дальнейшее развитие математических методов решения задачи моноимпульсной пеленгации представлено в работах А.А. Логинова и М.Ю. Семёновой [7], М.А. Богословской [8], Н.А. Дубровина [9], В.И. Орешкина [10], В.Т. Ермолаева и А.Г. Флаксмана [11] и других учёных. Классическими считаются методы пеленгации: метод максимума, минимума, суммарно-разностный метод [1,4,5].

К современным пеленгационным моноимпульсным системам предъявляются жёсткие точностные требования решения поставленной задачи в реальном времени. Это необходимо для минимизации времени установления сеанса связи и достижения максимального ОСШ во время сеанса. Классические методы решения задачи пеленгации не могут реализовать характерные для современных систем требования по нескольким причинам.

Во-первых, в ходе эксплуатации на орбите на антенные системы воздействует множество факторов, приводящих к искажению конструкции системы, и как следствие, диаграммы направленности. В настоящее время существуют средства, позволяющие оценивать и учитывать смещение некоторых точек рефлектора от исходного положения [12]. Учесть влияние деформации антенной системы возможно, выполняя расчёт диаграммы направленности методами, вычисляющими распределение токов в рефлекторе [13], однако подобная задача является трудоёмкой и требует значительных временных и вычислительных ресурсов.

Во-вторых, существующие алгоритмы [1,2] для решения задачи предполагают, что предварительная фильтрация амплитуд зарегистрированного сигнала от шума выполнена точно. В действительности предварительная обработка не может полностью исключить влияние шумов. Шум на трассе абонент – космический аппарат предполагается гауссовым, тогда распределение погрешностей оценки амплитуд соответствует распределению Рэлея, которое обладает ненулевым математическим ожиданием [14].

В-третьих, традиционные алгоритмы определения пеленга ИРИ на моноимпульсным методом [1] работают в предположении, что в ДН каждого луча содержится только главный лепесток, а боковые лепестки исключаются из рассмотрения. Либо используется аппроксимация ДН гладкими функциями, как правило, функцией Гаусса [2]. Однако на практике ДН каждого из лучей антенной системы являются многолепестковыми (многоэкстремальными), что существенно усложняет задачу определения пеленга. По сравнению с приёмом сигнала с направлений, соответствующих главным лепесткам ДН лучей (рабочая область), при приёме сигнала с направлений, соответствующих боковым лепесткам ДН, существенно возрастает погрешность определения пеленга на ИРИ [7-9]. Это

происходит из-за повышения частоты возникновения статистически редких аномально больших погрешностей пеленгации (выбросов) с выходом пеленга за пределы рабочей области. Существующие методики, такие как угловое стробирование [15] или селекция с использованием нейронных сетей [8], позволяют оценить наличие попадания пеленга в рабочую область, но они фиксируют только факт попадания. Выбросы же могут возникать не только вне рабочей области, но и внутри неё. Интерес представляет разработка алгоритма выявления выбросов, независимо от области углов, в которой возник выброс.

Указанные факторы не связаны друг с другом, что открывает возможность их независимого учёта для уточнения ДН лучей антенной системы и повышения точности алгоритмов решения задачи пеленгации.

### Цели и задачи работы

Целью настоящей работы является разработка математической модели, повышающей точность пеленгационной системы за счёт учёта обозначенных во введении факторов. Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- разработать методику уточнения диаграммы направленности с учётом известных параметров деформации антенной системы;
- разработать алгоритм пеленгации, учитывающий ненулевое математическое ожидание погрешности входных данных;
- разработать алгоритм выявления выбросов перед началом работы алгоритма пеленгации.

#### Методология и методы исследования

Для решения поставленных задач использовались методы статистической радиофизики, математической статистики и теории вероятностей, а также имитационное моделирование.

#### Научная новизна

В диссертации предложен и исследован алгоритм пеленгации с учётом деформации рефлектора принимающей антенной системы и ненулевого математического ожидания погрешностей амплитуд принятых сигналов. Учёт данных о деформации рефлектора выполнен по оригинальной методике, которая заключается в уточнении диаграммы направленности с использованием модели, основанной на замене формы реального рефлектора смещённым и повёрнутым (вписанным) параболоидом. Смещение главных максимумов ДН аппроксимируется квадратичной формой вектора геометрических параметров вписанного параболоида [16,17].

Предложен оригинальный алгоритм предобработки входных данных, обеспечивающий возможность решения задачи пеленгации с погрешностью меньше заданной. В отличие ОТ классических алгоритмов пеленгации, вся шумовая составляющая исключена предполагающих, ЧТО на этапе предобработки, предложенный алгоритм оценивает и учитывает её при решении системы пеленгационных уравнений. Для пеленгации минимизируется невязка между правой и левой частями системы уравнений. Исследовано поведение решения задачи пеленгации при использовании различных невязок. Для невязки, обеспечивающей наибольшую точность пеленгации, предложен аналитический метод определения оценки среднего значения шумовой составляющей.

Решение залачи пеленгации с погрешностью меньше заданной обеспечивается оригинальным алгоритмом, основанным на исключении из рассмотрения выбросов (данных, по которым не удастся определить пеленг с погрешностью, не превышающей заданную). В диссертации показано, что учёт дополнительной априорной информации, а также дополнение исходных данных энтропией амплитуд зарегистрированных сигналов, приводит к уменьшению вероятности исключения рассмотрения выброса. Применение ИЗ не предложенных алгоритмов и методики позволяет повысить точность пеленгации.

#### Теоретическая и практическая значимость работы

Существующие подходы позволяют за счёт усложнения аппаратной части пеленгационной системы космического базирования выполнить учёт факторов, необходимых для успешного функционирования системы. Предложенные в диссертации методика и алгоритмы позволяют добиться заданной точности пеленгации за счёт модификации исключительно программной алгоритмической части, без усложнения аппаратной части. Использование предложенных в диссертации методики и алгоритмов обеспечивает меньшую погрешность пеленгации, по сравнению с использованием других известных программных модификаций алгоритмов пеленгации.

Предложенные в диссертации алгоритмы являются устойчивыми к влиянию аддитивных шумов, а также обладают высокой вычислительной эффективностью. Разработанные алгоритмы могут быть использованы в работе перспективных спутниковых систем связи и системах определения местоположения. Результаты работы могут представлять интерес для таких научно-исследовательских организаций как: АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» (АО ИСС им. М.Ф. Решетнева, г. Железногорск), Сибирский государственный университет науки И технологий имени академика М.Ф. Решетнёва (СибГУ им. М.Ф. Решетнева, г. Красноярск), ФГБОУ ВО Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ФГБОУ ВО «ТУСУР», г. Томск), Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ, г. Москва).

#### Обоснованность и достоверность

Достоверность представленных в диссертации результатов основана на использовании обоснованных современных методов статистической радиофизики, методов математической статистики и проведении многочисленных компьютерных экспериментов, которые показывают воспроизводимость результатов исследований. Результаты, полученные в работе, не вступают в противоречие с известными результатами проводимых ранее исследований. Методики и алгоритмы, предложенные в диссертации, неоднократно обсуждались на всероссийских и международных конференциях, а также опубликованы в рецензируемых научных журналах.

## Основные положения, выносимые на защиту

- Методика уточнения диаграммы направленности с учётом известных параметров деформации антенной системы позволяет вычислить поправки к априорно известной диаграмме направленности, учёт которых, обеспечивает повышение точности пеленгации;
- Оптимизационный алгоритм пеленгации, основанный на минимизации косинусного рассогласования и выполняющий учёт ненулевого математического ожидания погрешности входных данных, обеспечивает более высокую точность, чем классический оптимизационный алгоритм пеленгации;
- Алгоритм выявления факта попадания пеленга в рабочую область антенной системы и оценки области углов, среди которых может находиться пеленг, понижает вероятность возникновения выбросов среди результатов пеленгации;
- Результаты проведённого исследования показывают целесообразность применения предложенных в работе методики и алгоритмов в современных спутниковых системах связи.

## Апробация результатов

Основные результаты диссертации отражены в публикациях, среди которых 3 статьи в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК для специальности 1.3.4 – радиофизика физико-математические науки [A1–A3], 2 работы проиндексированы в международной базе SCOPUS [A1,A2]. Результаты диссертации докладывались на следующих научных конференциях:

- международной конференции «Информационные системы и технологии», Самара, СГАУ им. С.П. Королева, 2023 г. [А4];
- международной конференции «Современные технологии обработки сигналов», Москва, МТУСИ, 2023 г. [А5].
- всероссийской молодёжной научно-практической конференции «Нанотехнологии. Информация. Радиотехника», Омск, ОмГТУ, 2024 г. [А6].
- международной конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение», Москва, РНТОРЭС им. А.С. Попова, 2018–2020 гг. [А7–А9];
- международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, СевГУ, 2019 и 2020 гг. [А10,А11];
- международной конференции «Перспективные информационные технологии», Самара, СГАУ им. С.П. Королева, 2019, 2021 гг. [A12,A13];
- международной конференции «Информационные системы и технологии», Нижний Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2018–2020 гг. [А14–А16];
- научной конференции по радиофизике, Нижний Новгород, ННГУ им Н.И. Лобачевского, 2018, 2019 и 2021, 2022 гг. [А17–А20];

## Личный вклад автора

Автор принимал непосредственное участие в формулировании целей работы, постановке задач, разработке, реализации и исследовании алгоритмов учёта деформации рефлектора антенной системы, выявления выбросов, решения задачи пеленгации. Выбор направления исследования, постановка задач и обсуждение полученных результатов проводилось вместе с научным руководителем – зав. каф. ИТФИ, проф., д.ф.-м.н. О.А. Морозовым, а также с проф., д.т.н. В.Р. Фидельманом. Разработка, реализация и исследование точности предложенных в работе алгоритмов выполнены лично автором.

## Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 131 страницу. Диссертация включает 32 рисунка и список литературы из 122 наименований.

## Краткое содержание диссертации

Во **введении** обосновывается актуальность работы, формулируются цели работы, обсуждается научная новизна, научная и практическая значимость, достоверность полученных результатов, кратко излагается содержание работы, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В <u>первой главе</u> проведён обзор существующих методов расчёта диаграмм направленности, предложен и исследован оригинальный метод уточнения ДН на основе геометрической информации о положении рефлектора.

В разделе 1.1 рассматриваются свойства однорефлекторных параболических антенных систем, вводятся основные понятия теории антенн.

В разделе 1.2 представлены описания методов расчёта ДН: метода моментов [18], метода физической оптики [19] и метода физической теории дифракции [20]. Метод физической оптики отмечен как метод, обеспечивающий достаточную точность при удовлетворительных вычислительных затратах. Этот метод является применимым при вычислении диаграмм направленности антенных систем, геометрический размер рефлектора которых много больше используемой длины волны, что соответствует рассматриваемым в диссертации антенным системам.

В <u>разделе 1.3</u> представлено описание существующих методов уточнения ДН, способных работать в реальном масштабе времени. Обозначены причины, по которым существующие методы не могут быть применены к решаемой задаче. Рассмотрены телеметрические системы, предоставляющие информацию о положении рефлектора, а также описание используемой в них математической модели аппроксимации формы рефлектора вписанным параболоидом.

В связи с требованием крайне узких ДН антенных систем космического базирования, в них, как правило, используют крупногабаритные зонтичные рефлекторы (более 8 м в диаметре). В ходе эксплуатации на антенные системы воздействует множество факторов, приводящих к искажению формы и положения рефлектора, что влечёт за собой изменение диаграммы направленности. Из всех искажений ДН для задачи пеленгации наиболее критичным является смещение направлений на главные максимумы ДН лучей антенной системы. В существующих работах отмечается [16], что для определения этих смещений эффективным оказывается приближенное описание деформации рефлектора шестью параметрами. Для этого подбирается смещённая и повёрнутая вырезка из идеального расчётного параболоида; такая вырезка называется модельной. Параметры смещения вдоль трёх осей канонической системы координат ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ ) и поворота в пространстве (крен –  $\gamma$ , тангаж –  $\vartheta$ , рысканье –  $\psi$ ) идеальной расчётной вырезки подбираются таким образом, чтобы смещённая и повёрнутая вырезка обладала наименьшими отклонениями от реальной деформированной поверхности рефлектора. Методика определения геометрических параметров модельной вырезки ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ ,  $\gamma$ ,  $\vartheta$ ,  $\psi$ ) представлена в [17].

В работе [16] выполнено моделирование тепловых деформаций антенной системы, аналогичной рассматриваемой в диссертации системе, при движении космического аппарата на геостационарной орбите. Результаты численного (CKO) показывают, среднеквадратичное отклонение эксперимента ЧТО поверхности рефлектора от модельной вырезки в процессе эксплуатации превышает MM. антенной системы не 0,7 В настоящей диссертации рассматривается функционирование антенны при частоте настройки 1,6 ГГц, что соответствует длине волны ~ 187,5 мм. В связи с тем, что ожидаемое СКО поверхности рефлектора от модельной вырезки оказывается малым по сравнению с рассматриваемой длиной волны, в диссертации использовано приближение отсутствия случайных отклонений рефлектора от модельной вырезки.

В разделе 1.4 представлена оригинальная методика уточнения ДН антенной системы с использованием геометрических параметров вписанного параболоида. Предложенная методика основана на предположении, что при ожидаемых на изменениях геометрии системы практике малых антенной происходит значительное смещение направлений на главные максимумы ДН лучей. аппроксимировать квадратичной Смешения предложено формой вектора геометрических параметров модельной вырезки ( $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \gamma, \vartheta, \psi$ ).

Для выполнения расчётов поверхность деформированного рефлектора заменяется на модельную вырезку. Таким образом, задача определения ДН деформированной антенной системы сводится к задаче определения ДН антенной системы (AC) со смещённым и повёрнутым рефлектором. Рассматриваемая модель не учитывает локальных деформаций, которые оказывают незначительное для задачи пеленгации влияние на ДН (т.к. ожидаемые СКО от модельной вырезки малы по сравнению с рассматриваемой длиной волны [16]). Деформации рефлектора как целого описываются рассматриваемой моделью и оказывают значительное влияние на направления на главные максимумы ДН лучей АС.

С математической точки зрения приближение ДН, предложенное в настоящей главе, описывается выражением:

$$d_{ni}'(az,el) \approx d_{ni}(az + \Delta az_i, el + \Delta el_i), \qquad (1)$$

где  $d_{ni}'$  – нормированная амплитудная ДН *i*-го луча деформированной антенной системы,  $d_{ni}$  – нормированная амплитудная ДН *i*-го луча исходной антенной

системы,  $\Delta az_i$  и  $\Delta el_i$  – поправки к направлению на главный максимум  $d_{ni}$  по азимуту az и углу места el соответственно.

В случае шести геометрических параметров поправки выражаются следующим образом:

$$\Delta az \approx \mathbf{t}_{+}^{\mathrm{T}} \mathbf{B}_{+}^{az} \mathbf{t}_{+}, \qquad \Delta el \approx \mathbf{t}_{+}^{\mathrm{T}} \mathbf{B}_{+}^{el} \mathbf{t}_{+}, \qquad (2)$$

где  $\mathbf{t}_+$  — вектор геометрических параметров положения рефлектора (с размерностью 7 × 1),  $\mathbf{B}_+^{az}$  и  $\mathbf{B}_+^{el}$  — матрицы аппроксимирующих коэффициентов (7 × 7) для азимута и угла места соответственно. Матрицы  $\mathbf{B}_+^{az}$  и  $\mathbf{B}_+^{el}$  обладают одинаковой структурой, которая представлена в выражении для  $\mathbf{B}_+$ :

$$\mathbf{t}_{+} = \begin{pmatrix} \gamma \\ \mathcal{G} \\ \psi \\ \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ 1 \end{pmatrix}, \qquad \mathbf{B}_{+} = \begin{pmatrix} 0 & b_{\gamma \theta} & b_{\gamma \psi} & b_{\gamma x} & b_{\gamma y} & b_{\gamma z} & a_{\gamma} \\ 0 & 0 & b_{\theta \psi} & b_{\theta x} & b_{\theta y} & b_{\theta z} & a_{\theta} \\ 0 & 0 & 0 & b_{\psi x} & b_{\psi y} & b_{\psi z} & a_{\psi} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_{xy} & b_{xz} & a_{x} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{yz} & a_{y} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{z} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$
(3)

Элементы **B**<sub>+</sub> представляют собой коэффициенты перед степенями геометрических параметров, а индексы элементов отвечают за параметры, на которые умножается коэффициент. Вычисление элементов матриц **B**<sub>+</sub><sup>*az*</sup> и **B**<sub>+</sub><sup>*el*</sup> выполняется по набору пар значений геометрических параметров положения рефлектора антенной системы **t**<sub>+*i*</sub> и вычисленных поправок  $\Delta az_i$  и  $\Delta el_i$ . В настоящей работе эти поправки определяются по ДН, вычисленной методом физической оптики [20]. Из (2) следует, что

$$\Delta az = b_{\gamma \vartheta} \gamma_i \vartheta_i + b_{\gamma \phi} \gamma_i \phi_i + b_{\gamma x} \gamma_i x_i + b_{\gamma y} \gamma_i y_i + \dots + a_z z_i .$$
<sup>(4)</sup>

Выражение (4) можно рассматривать как систему линейных уравнений относительно элементов матрицы  $\mathbf{B}_{+}^{az}$  и переписать следующим образом:

$$\mathbf{U}\mathbf{x} = \mathbf{u}\,,\tag{5}$$

где введены обозначения:

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} \gamma_1 \mathcal{G}_1 & \gamma_1 \psi_1 & \gamma_1 x_1 & \dots & z_1 \\ \gamma_2 \mathcal{G}_2 & \gamma_2 \psi_2 & \gamma_2 x_2 & \dots & z_2 \\ \gamma_3 \mathcal{G}_3 & \gamma_3 \psi_3 & \gamma_3 x_3 & \dots & z_3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \gamma_M \mathcal{G}_M & \gamma_M \psi_M & \gamma_M x_M & \dots & z_M \end{pmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{pmatrix} b_{\gamma \mathcal{G}} \\ b_{\gamma \psi} \\ \dots \\ a_z \end{pmatrix}, \quad \mathbf{u} = \begin{pmatrix} \Delta a z_1 \\ \Delta a z_2 \\ \dots \\ \Delta a z_M \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где M – количество пар поправок к направлению на главный максимум и векторов геометрических параметров положения рефлектора. Матрица U имеет размерность  $M \times 21$ , вектор  $\mathbf{x} - 21 \times 1$ ,  $\mathbf{u} - M \times 1$ . Размерность вектора коэффициентов  $\mathbf{x}$  равна количеству ненулевых коэффициентов в определении (3).

Количество строк матрицы U и размерность вектора **u** соответствуют количеству пар поправок к направлению на главный максимум и векторов геометрических параметров модельной вырезки, используемых для подбора коэффициентов. Вектор коэффициентов **x** вычисляется следующим образом:

$$\mathbf{x} = \mathbf{U}^{\#}\mathbf{u} \,, \tag{7}$$

где U<sup>#</sup> – псевдообратная матрица Мура-Пенроуза для матрицы U. Аналогичные действия выполняются для  $\mathbf{B}_{+}^{el}$ . По предложенной методике вычисляются матрицы  $\mathbf{B}_{+}^{az}$  и  $\mathbf{B}_{+}^{el}$  для каждого из лучей антенной системы.

В <u>разделе 1.5</u> выполнены численные эксперименты для исследования точности корректировки направлений на главные максимумы ДН лучей антенной системы. Данные для аппроксимации получены с использованием метода физической оптики. Выполнено сравнение точности пеленгации с использованием и без использования предложенной методики.

Исследование выполнено на примере офсетной параболической антенны с параметрами: диаметр раскрыва рефлектора D = 10 м, фокальное расстояние F = 8 м, офсетный угол  $\chi = 35^{\circ}$ , частота настройки антенной системы f = 1,6 ГГц, количество лучей N = 16. Указанные параметры использованы для проведения вычислительных экспериментов во всех главах диссертации.

Рассчитанная методом физической оптики нормированная амплитудная диаграмма направленности  $d_n(az,el)$  приведена на рисунке 1. Линии постоянного уровня изображены для значения 0,5. Номера лучей ДН отмечены числами возле соответствующих им максимумов.



Рисунок 1. Нормированная амплитудная ДН рассматриваемой антенной системы

Для оценки точности предсказания поправок к направлениям на главные максимумы ДН лучей антенной системы по методике, предложенной в разделе 1.4

проведены оценочные численные эксперименты. Показано, что при характерных деформациях антенной системы предложенная модель позволяет вычислять искомые поправки со средней погрешностью ~ 0,007°, что позволяет учесть деформацию в процессе пеленгации. На рисунке 2 построена зависимость погрешности пеленгации от ОСШ (SNR) при учёте и без учёта смещения направлений на главные максимумы ДН лучей антенной системы. Символами «при на рисунке 2 отображены данные, полученные с использованием неуточнённых ДН. Символами «×» показаны данные, полученные с использованием ДН лучей с уточнёнными по предложенной методике направлениями на главные максимумы.



Рисунок 2. Зависимость средней погрешности пеленга от ОСШ при характерных значениях ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ ,  $\gamma$ ,  $\vartheta$ ,  $\psi$ )

Следует отметить, что моделирование приёма сигнала выполнено с использованием диаграммы направленности, вычисленной методом физической оптики, т.е. исходные данные для верификации алгоритма получены с учётом возможного изменения коэффициента усиления, ширины главного лепестка, изменения формы боковых лепестков антенной системы. Из рисунка 2 следует, что если не учитывать характерные повороты модельной вырезки вследствие деформаций на величину ~ 1°, то они приводят к увеличению погрешности пеленга на величину ~ 1°, что в условиях космического базирования антенной системы является неприемлемым. При выполнении учёта геометрических параметров модельной вырезки по предложенной методике существенного увеличения погрешности пеленга не происходит. Таким образом показано, что если принимать сигнал деформированной антенной системой, а пеленгацию выполнять в предположении, что система не деформирована, то погрешность пеленгации существенно возрастает. Однако, если в процессе пеленгации учесть по крайней мере смещение главных максимумов ДН лучей антенной системы, удаётся существенно снизить погрешность пеленгации.

Как правило, оценка деформаций выполняется с использованием дальномера, а их компенсация производится механически – добавлением в состав рефлектора прецизионного поворотного механизма, либо с использованием настраиваемой фазированной антенной решётки в качестве принимающего элемента антенны. Оба варианта компенсации усложняют аппаратный состав антенной системы, в то время как предложенная методика позволяет выполнять не компенсацию, а учёт деформации исключительно программными методами. Также необходимо отметить, что предложенная методика работает при допущениях: характерный размер случайных локальных деформации рефлектора должен быть существенно меньше длины волны, а характерная величина смещений модельной вырезки должна быть меньше длины волны.

Учёт деформации антенной системы может быть произведен с помощью аппаратной процедуры корректировки ДН по сигналам станций, расположенных на Земле. Однако, данная процедура является существенно трудоёмкой, времязатратной и требует манипуляций с положением космического аппарата. Предложенный в диссертации алгоритм может служить для учёта деформации антенной системы между процедурами аппаратной корректировки ДН.

Во **второй главе** рассмотрены методы пеленгации, приведены основные критерии и подходы, применяемые в решении задачи пеленгации, предложен и исследован оригинальный алгоритм пеленгации, учитывающий ненулевое среднее значение рэлеевского шума.

В <u>разделе 2.1</u> рассмотрены теории, на основе которых возможно построение новых решений задачи пеленгации, обозначены основные проблемы, возникающие в процессе решения поставленной задачи.

В настоящее время широкое распространение получил подход, в котором для решения задачи пеленгации используются антенные системы с десятью лучами и более [2,21]. Амплитуды сигналов, зарегистрированных в лучах антенной системы, описываются выражением:

$$A_{i} = A_{0}d_{ni}(az_{0}, el_{0}) + \zeta_{i}, i \in [1, N],$$
(8)

где  $A_i$  – амплитуда сигнала, зарегистрированного в *i*-ом луче антенной системы,  $d_{ni}$  – нормированная амплитудная ДН *i*-го луча антенной системы,  $(az_0, el_0)$  – направление пеленга,  $A_0$  – амплитуда сигнала при приёме с направления, соответствующего максимуму ДН,  $\zeta_i$  – погрешность определения амплитуды сигнала.

Однако существующие методы предполагают, что амплитуды сигналов, зарегистрированных в лучах антенной системы, предварительно очищены от шумовой составляющей и пренебрегают значениями  $\zeta_i$ . Выражение (8) представляет собой систему нелинейных уравнений относительно ( $az_0$ ,  $el_0$ ) и  $A_0$ . Величина  $A_0$  не представляет практической ценности для решения задачи пеленгации и обычно исключается из системы уравнений любым доступным преобразованием. Полученная система может быть решена оптимизацией функции рассогласования между правыми и левыми частями уравнений по параметрам  $az_0$  и  $el_0$ . В качестве функции рассогласования обычно выбирается квадратичное рассогласование суммарно-разностной системы уравнений  $L_{2SQ}$  [7]:

$$L_{2SQ}(az, el) = \sum_{i,j,i\neq j} \left( \frac{A_i - A_j}{A_i + A_j} - \frac{d_{ni}(az, el) - d_{nj}(az, el)}{d_{ni}(az, el) + d_{nj}(az, el)} \right)^2.$$
(9)

Такой подход называется оптимизационным и в диссертации отмечен, как учитывающий особенности реальных диаграмм направленности.

В <u>разделе 2.2</u> предложен алгоритм пеленгации, основанный на оптимизационном алгоритме и выполняющий учёт особенности распределения погрешности амплитуд сигналов.

Известно, что погрешность определения амплитуды сигнала  $\zeta_i$  в случае присутствия аддитивного белого гауссова шума обладает ненулевым средним значением  $\mu_0$ , т.е. (8) представима в виде:

$$A_{i} = A_{0}d_{ni}(az_{0}, el_{0}) + \mu_{0} + \Delta\zeta_{i}, i \in [1, N],$$
(10)

где  $\Delta \zeta_i$  – случайная величина с нулевым средним значением. Если значение  $\mu_0$  известно, то случайная составляющая амплитуд сигналов уменьшается до значения  $\Delta \zeta_i$ .

Существующие амплитудные алгоритмы пеленгации, рассмотренные в разделе 2.1, пренебрегают значениями  $\zeta_i$ . На практике подобные предположения выполняются приближенно, что при низких значениях ОСШ существенно влияет на точность пеленгации. В настоящей работе предлагается пренебрегать не  $\zeta_i$ , а только  $\Delta \zeta_i$ . Тогда система уравнений для определения пеленга принимает вид:

$$\frac{A_i}{A_0} = d_{ni} (az_0, el_0) + v_0, i \in [1, N],$$
(11)

где  $v_0 = \mu_0 / A_0$  – параметр, введённый для удобства дальнейших вычислений.

Выражение (11) представляет собой систему нелинейных уравнений, неизвестными в которой являются  $A_0$ ,  $v_0$ ,  $az_0$ ,  $el_0$ . Для решения задачи пеленгации критически важным является нахождение параметров  $az_0$  и  $el_0$ . Оценка параметров  $A_0$  и  $v_0$  является необязательной, но возможной. В разделе 2.2 предлагается несколько способов нахождения пеленга ( $az_0$ ,  $el_0$ ) с использованием системы уравнений (11), первый из которых аналогичен стандартному решению системы уравнений (8):

$$L_{3SQ} = \sum_{i,j,i\neq j} \left( \frac{A_i - A_j}{A_i + A_j} - \frac{d_{ni}(az,el) - d_{nj}(az,el)}{d_{ni}(az,el) + d_{nj}(az,el) + 2v} \right)^2;$$
(12)  
$$(az_0, el_0, v_0) = \arg\min L_{3SQ}(az,el,v).$$
(13)

Второй способ решения системы уравнений (11) заключается в рассмотрении системы как тождества векторов. В методах машинного обучения получил широкое распространение способ сравнения векторов с использованием косинусного рассогласования [22]. Тогда:

$$L_{3COS} = -\frac{\sum_{i} A_{i} (d_{ni}(az, el) + v)}{\sqrt{\sum_{i} A_{i}^{2}} \sqrt{\sum_{i} (d_{ni}(az, el) + v)^{2}}};$$
(14)
$$(az_{0}, el_{0}, v_{0}) = \arg\min L_{3COS}(az, el, v).$$
(15)

Третий способ решения системы уравнений (11) заключается в рассмотрении *A<sub>i</sub>* / *A*<sub>0</sub> как статистических распределений. В таком случае задача сводится к поиску таких  $az_0$ ,  $el_0$  и  $v_0$ , при которых два статистических распределения будут различаться минимально. В качестве меры близости статистических распределений зачастую используется расстояние Кульбака-Лейблера [23]:

$$L_{3KL} = \sum_{i} \left[ \frac{d_{ni}(az, el) + v}{\sum_{m} d_{nm}(az, el) + Nv} \ln \left( \frac{d_{ni}(az, el) + v}{A_{i}} \cdot \frac{\sum_{k} A_{k}}{\sum_{m} d_{nm}(az, el) + Nv} \right) \right]; \quad (16)$$
$$(az_{0}, el_{0}, v_{0}) = \arg \min L_{3KL}(az, el, v). \quad (17)$$

Несмотря на то, что методы с использованием суммарно-разностных уравнений, косинусного рассогласования и расстояния Кульбака-Лейблера схожи между собой, возможны ситуации, в которых они будут решать задачу пеленгации с существенно различными точностями. Это обусловлено тем, что оптимизируемые функции, используемые в них, характеризуются различной степенью нелинейности.

В <u>разделе 2.3</u> исследованы точности пеленгации, достигаемые при использовании суммарно-разностного квадратичного рассогласования, косинусного рассогласования и расстояния Кульбака-Лейблера, на примере антенной системы, рассмотренной в разделе 1.5. Минимизация функций рассогласования во всех трёх случаях выполнена симплексным методом [24]. Начальное приближение пеленга находится перебором по области допустимых значений. Построена зависимость погрешности пеленгации, с использованием рассмотренных алгоритмов, от величины ОСШ. Выполнено сравнение со стандартным суммарно-разностным оптимизационным алгоритмом.

На рисунке 3 представлены зависимости средней погрешности пеленга ( $\delta$ ) от ОСШ для различных методов. Для построения графика использован логарифмический масштаб по оси  $\delta$ .



Рисунок 3. Зависимости средней погрешности пеленга от ОСШ для методов, использующих:  $\times -L_{2SQ}, \Box -L_{3SQ}, \circ -L_{3COS}, \diamond -L_{3KL}.$ 

Из графиков следует, что при ОСШ выше  $15 \div 17$  дБ все рассмотренные методы работают с приблизительно равной средней погрешностью. Это объясняется тем, что метод, использующий  $L_{2SQ}$ , принимает неявное

предположение о том, что среднее значение погрешности регистрируемых амплитуд v равно нулю, в то время как предложенные методы ищут значение v оптимизационным способом. При этом предположение метода, использующего  $L_{2SQ}$ , выполняется достаточно точно. При значениях ОСШ ниже 6 дБ выделяется метод, использующий косинусное рассогласование  $L_{3COS}$ , погрешность которого с уменьшением ОСШ возрастает существенно медленнее. При ОСШ равном 10 дБ использование его позволяет снизить погрешность пеленгации на ~ 0,05°. При ОСШ равном 0 дБ снижение погрешности метода пеленгации с использованием  $L_{3COS}$  относительно остальных методов в среднем составляет ~ 0.6°. Таким образом показано, что погрешность пеленгации можно сократить за счёт использования нестандартной функции рассогласования, а также одновременного определения и учёта параметра шума  $v_0$ .

С практической точки зрения представляет интерес не только среднее значение погрешности пеленгации, но и величина погрешности, которая не будет превышена с заданной вероятностью. На рисунке 4 отмечен полный диапазон реализовавшихся погрешностей, а также диапазон погрешностей за исключением 5% наиболее и 5% наименее точных результатов пеленгации.



Рисунок 4. Диапазоны погрешностей пеленгации с использованием L<sub>3COS</sub>

Таким образом на рисунке 4 верхняя сторона каждого прямоугольника показывает погрешность, которая не будет превышена с вероятностью 0,95.

В <u>разделе 2.4</u> выведено выражение для аналитической оценки оптимального значения параметра шума *v*<sub>0</sub> в выражении (15) при заданном распределении амплитуд в лучах и заданного предполагаемого направления приёма сигнала. Аналитическая оценка имеет вид:

$$v_0 = \frac{\{A\}\{d^2\} - \{Ad\}\{d\}}{\{Ad\} - \{A\}\{d\}},$$
(18)

где введены обозначения:

$$\{A\} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} A_i , \qquad (19)$$

$$\{Ad\} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} A_i d_{ni} (az, el),$$
(20)

$$\{d\} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} d_{ni}(az, el), \qquad (21)$$

$$\left\{d^{2}\right\} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} d_{ni}^{2} (az, el).$$
(22)

Использование такой оценки позволяет сократить количество неизвестных в системе уравнений, решаемой в разделе 2.3. Модифицированную функцию рассогласования  $L_{2COS}$  в таком случае можно записать следующим образом:

$$L_{2COS} = -\frac{\sum_{i} A_{i}(d_{ni}(az, el) + v_{0}(az, el))}{\sqrt{\sum_{i} A_{i}^{2}} \sqrt{\sum_{i} (d_{ni}(az, el) + v_{0}(az, el))^{2}}};$$

$$(23)$$

$$(az_{0}, el_{0}) = \arg\min L_{2COS}(az, el).$$

$$(24)$$

Сравнение погрешностей пеленгации, которые не будут превышены с вероятностью 0,95 с использованием  $L_{3COS}$  и  $L_{2COS}$  представлены на рисунке 5.



Рисунок 5. Зависимости погрешности пеленга, которая не будет превышена с вероятностью 0,95 от ОСШ для методов, использующих: □ – *L*<sub>3COS</sub>, × – *L*<sub>2COS</sub>

Из рисунка 5 видно, что отказ от численной оптимизации по параметру v<sub>0</sub> приводит к незначительному снижению точности на ~ 0,02° для ОСШ равного 5 дБ при теоретическом приросте производительности вычислений на порядок. В рассмотренной конфигурации численных экспериментов прирост производительности составил ~ 8 раз. Таким образом, если при ОСШ ниже 15 ÷ 17 дБ требуется пеленгация с максимальной точностью без учёта производительности, то рекомендуется использовать L<sub>3COS</sub>, при необходимости экономии вычислительных ресурсов рекомендуется использовать L<sub>2COS</sub>.

<u>Третья глава</u> диссертации посвящена разработке и верификации новой методики борьбы со статистически редкими аномально большими погрешностями

пеленгации, называемыми выбросами. Также в третьей главе рассмотрены существующие методы борьбы с выбросами.

В <u>разделе 3.1</u> обозначены особенности алгоритмов пеленгации, в частности, возможность реализации выбросов. В разделе представлено исследование распределения ошибки по направлениям приёма сигнала.

В разделе 3.2 исследованы известные методики определения факта принадлежности пеленга к рабочей области и детектирования выбросов. проблемы, усложняющие использование известных Обозначены методик. Отмечается показанная в существующих работах эффективность применения нейронных сетей и алгоритмов углового стробирования для решения указанной задачи [8]. Погрешность считается аномально большой, если её значение превышает  $\delta_0 = 0.15^\circ$ . Перед каждым вычислением пеленга входные данные подвергаются классификации (классы выброс «N» / не выброс «P») с использованием многослойного персептрона, целевая функция которого при обучении учитывает только попадание пеленга в рабочую область. Применение подобного подхода позволяет добиться вероятности верной классификации ~ 0,95. При этом вероятность присвоения пеленгу с допустимой погрешностью метки «N»  $P_1$  составляет ~ 0,1. Как правило, входные данные, которым присвоена метка «N», не обрабатываются.

При выявлении выбросов следует учесть, что наиболее важной является соответствующих не выбросам. обработка данных, Обработка данных, соответствующих выбросам, увеличивает среднюю погрешность пеленгации, но не приводит к непригодности системы. Таким образом рассматриваемая система более устойчива к возникновению ошибок первого рода (рассмотрение выброса), по сравнению возникновением ошибок второго рода (исключение из с выброса). Вследствие априорной неопределённости рассмотрения не соотношения вероятностей появления данных, соответствующих выбросам и не выбросам (дисбаланса классов), не следует напрямую использовать вероятность произвольной ошибки для оценки качества работы системы. В рассматриваемой задаче как критерий качества работы предлагается использовать вероятность P<sub>1</sub> неверной классификации данных при условии, что в действительности они соответствуют не выбросу (вероятность статистической ошибки первого рода).

В <u>разделе 3.3</u> предложен алгоритм, позволяющий снизить вероятность  $P_1$ . Для этого нейронная сеть используется не в качестве жесткого классификатора, а для оценки параметра доверия входным данным  $P_O$ , который предлагается задать следующим образом:

$$P_O\left(az_0, el_0, \delta\right) = P_O\left(A_i\right) = \frac{1}{1 + \exp\left(\alpha_r \left[\sqrt{az_0^2 + el_0^2} - r_0\right]\right)} \cdot \frac{1}{1 + \exp\left(\alpha_\delta \left[\delta - (\delta_0 + \varepsilon)\right]\right)}, \quad (25)$$

где параметры  $\alpha_r$  и  $\alpha_{\delta}$  отвечают за скорость изменения параметра доверия возле пороговых значений  $r_0$  и  $\delta_0$ , а параметр  $\varepsilon$  отвечает за доверие при превышении порогового значения  $\delta_0$ .

Применение выражения (25) обеспечивает снижение уровня доверия с удалением от рабочей области и с возрастанием погрешности пеленга, и в отличие

от существующего подхода обеспечивает учёт не только попадания пеленга в рабочую область, но и его погрешности. Известно, что набору нормированных неотрицательных чисел можно сопоставить значение информационной энтропии, которая характеризует неравномерность набора *<sub>Gi</sub>*:

$$H(\varsigma_i) = -\sum_{i=1}^N \varsigma_i \log_2 \varsigma_i, \quad \varsigma_i = \frac{A_i}{\sum_{k=1}^N A_k}.$$
(26)

Значение энтропии вне рабочей области оказывается выше за счёт отсутствия максимумов ДН лучей антенной системы и увеличения равномерности наборов  $\zeta_i$ . Этот факт можно использовать при детектировании выбросов. Как правило на вход нейронной сети для классификации выбросов подаётся только набор  $\zeta_i$ , в диссертации же предлагается расширить исходные данные для работы алгоритма добавлением нормированного значения энтропии *H*. Таким образом в предложенном алгоритме используется многослойный персептрон, который принимает на вход набор  $\zeta_i$  и *H*, и оценивает по ним  $P_O(\zeta_i)$ :

$$P_O(\varsigma_i) \approx \psi(\omega_k, \varsigma_i, H), \qquad (27)$$

где  $\psi$  – значение выхода многослойного персептрона, а  $\omega_k$  – набор весов многослойного персептрона [25].

Использование оценки  $P_O$  позволяет задать удовлетворительную вероятность  $P_1$ . В диссертации удовлетворительной считается  $P_1 \equiv 0,01$ . Соответствующими выбросам считаются такие наборы  $\zeta_i$ , для которых:

$$P_O(\varsigma_i) \approx \psi(\omega_k, \varsigma_i, H) < t_O(P_1), \qquad (28)$$

где  $t_O$  – пороговое значение, определяемое в численном эксперименте.

вероятности статистической ошибки Снижение первого рода  $P_1$ обуславливает повышение вероятности статистической ошибки второго рода. В рассматриваемой ситуации это не является критичным, если средняя погрешность пеленгации увеличивается незначительно. Для контроля этого критерия предлагается выполнять оценку погрешности пеленга, которая не будет превышена с вероятностью 0,95 ( $\delta_{0.95}$ ).

среднее значение её погрешности Оценка направления пеленга и определяются минимизацией функции (23) по параметрам az и el. Для сравнения предложенного алгоритма с существующим выполнено обучение методом обратного распространения ошибки [25] многослойных персептронов, используемых в соответствующих алгоритмах. Выполненное компьютерное моделирование показывает, что для фиксации  $P_1 = 0.01$  следует использовать  $t_0 = 0.071$ . Пороговое значение  $t_0$  определено по выборке, ОСШ для которой, равно 0 дБ. Наименьшее из рассматриваемых ОСШ использовано лля определения t<sub>0</sub> для наибольшей устойчивости алгоритма к шумам. Зависимости погрешности пеленгации, которая не превышается с вероятностью 0,95 ( $\delta_{0,95}$ ), от ОСШ для предложенной и известной методик представлены на рисунке 6.



Рисунок 6. Зависимость погрешности пеленгации, которая не превышается с вероятностью 0,95 от ОСШ с использованием: × – известного алгоритма, ◊ – предложенного алгоритма.

Численные эксперименты показывают, что применение предложенного алгоритма позволяет снизить вероятность  $P_1$  с 0,11 до 0,01. Снижение вероятности исключения из рассмотрения не выброса ведёт к увеличению доли рассматриваемых выбросов, приводит что к повышению погрешности пеленгации. Тем не менее погрешность пеленгации, которая не будет превышена с вероятностью 0,95 при этом возрастает не более, чем в полтора раза: с 0,14° до Преимущество предложенного метода 0.21°. заключается В отсутствии необходимости использования дополнительной аппаратной части, и в снижении существующих вероятности  $P_1$ относительно методов. В заключении сформулированы основные результаты диссертации и следующие из них выводы.

#### Основные результаты диссертации

Разработана методика уточнения диаграммы направленности с учётом известных параметров деформации антенной системы, которая подразумевает аппроксимацию зависимости смещения главных максимумов ДН лучей антенной системы от параметров деформации. Предложенная методика позволяет снизить погрешность пеленгации при фиксированном ОСШ.

Разработан алгоритм пеленгации, учитывающий ненулевое математическое ожидание погрешности входных данных. Алгоритм за счёт введения дополнительного неизвестного параметра позволяет оценить и учесть наличие шумовой составляющей в сигнале, что приводит к повышению точности пеленгации при фиксированном ОСШ.

Разработан алгоритм выявления выбросов перед началом работы алгоритма пеленгации. Предложенный алгоритм основан на аппроксимации зависимости предложенного параметра доверия от набора амплитуд, зарегистрированных в лучах антенной системы, и энтропии этого набора с использованием нейронной сети. Аппроксимация строится по синтетическим данным с учётом положения пеленга и погрешности его определения. Разработанный алгоритм позволяет на порядок снизить вероятность исключения не выброса из рассмотрения при незначительном уменьшении точности пеленгации при фиксированном ОСШ.

Предложенные в работе методика и алгоритмы цифровой обработки сигналов могут быть применены в современных спутниковых системах связи и системах определения местоположения.

## Список литературы

1. Леонов, А.И. Моноимпульсная радиолокация / А.И. Леонов, К.И. Фомичев. – М. : Радио и связь, 1984. 312 с.

2. Логинов, А.А. Алгоритмы повышения точности оценки пеленга в задаче амплитудной моноимпульсной пассивной локации / А.А. Логинов, О.А. Морозов, М.Ю. Семёнова // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2010. – № 5, Ч. 2. – С. 358–362.

3. Метод поиска сигналов радиоэлектронных средств в условиях сложной обстановки сигнально-помеховой использованием многолучевых с А.Ю. Гуменюк, самофокусирующихся адаптивных антенных решеток / А.П. Линкевичиус А.Г. Зайцев, Д.А. Тимаков, // Вестник Московского государственного технического университета ИМ. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». – 2016. – № 5(110). – С. 26–35.

4. Шифрин, Я.С. Антенны / Я.С. Шифрин. – ВИРТА, 1976. – 408 с.

5. Родс, Д.Р. Введение в моноимпульсную радиолокацию / Д.Р. Родс. –М. : Советское Радио, 1960. – 160 с.

6. Айзенберг, Г.З. Антенны УКВ / Г.З. Айзенберг, В.Г. Ямпольский, О.К. Терёшин. –М. : Связь, 1977. – Ч. 1. – 384 с.

7. Семёнова, М.Ю. Алгоритмы предварительной обработки сигналов в задаче пассивной моноимпульсной пеленгации : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.03 / Семёнова Марина Юрьевна. – Нижний Новгород, 2013. – 135 с.

8. Богословская, М.А. Повышение достоверности и точности измерения угловых координат целей моноимпульсным пеленгатором : дис. ... канд. тех. наук: 05.12.14 / Богословская Мария Александровна. – М., 2008. – 113 с.

9. Дубровин, Н.А. Алгоритмы пассивной пеленгации источников радиоизлучения коротковолнового диапазона: дис. ... канд. тех. наук: 05.12.14 / Дубровин Николай Александрович. – М., 2012. – 114 с.

10. Орешкин, В.И. Повышение точности пеленга сигнала в цифровой антенной решётке [Электронный ресурс] / В.И. Орешкин, Ю.М. Мелёшкин, В.К. Цветков // Труды МАИ. – 2021. – № 120. – Режим доступа: <u>https://trudymai.ru/published.php?ID=161424</u>

11. Двумерная пеленгация со сверхразрешением в автомобильном mimo радаре в условиях коррелированности целей / В.Т. Ермолаев, В.Ю. Семенов, А.Г. Флаксман, И.В. Артюхин, О.А. Шмонин // Электросвязь. – 2022. – Т. 33, № 8. – С. 45–52.

12. Система контроля геометрии крупногабаритной трансформируемой антенны и её наведение / М.Г. Матыленко, М.О. Дорофеев, Е.В. Бикеев, А.А. Алексеенко // Решетнёвские чтения, Красноярск, 12–14 ноября 2013. – Красноярск : Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2013. – Т. 1. – С. 194–196.

13. Драбкин, А.Л. Антенно-фидерные устройства / А.Л. Драбкин, В.Л. Зузенко, А.Г. Кислов. – М. : Сов. радио, 1974. – 536 с.

14. Палшков, В.В. Радиоприёмные устройства / В.В. Палшков. – М. : Радио и связь, 1984. – 392 с.

15. Максимов, М.В. Защита от радиопомех / М.В. Максимов, М.П. Бобнев, Б.Х. Кривицкий и др. – М. : Сов. радио, 1976. – 496 с.

16. Способ компенсации деформаций конструкции крупногабаритной антенны космического аппарата / Е.В. Бикеев, Е.Н. Якимов, М.Г. Матыленко, Г.П. Титов // Вестник СибГАУ. – 2016. – Т. 17, № 3. – С. 673–683.

17. Дорофеев, М.О. Методика определения пространственного положения недеформируемой конструкции космического аппарата / М.О. Дорофеев // Вестник СибГАУ. – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 395–399.

18. Harrington, R. Field computation by moment methods / R. Harrington. – New York : Wiley-IEEE Press, 1993. – 240 p.

19. Устройства СВЧ и антенны: учебник для вузов. / Д.И. Воскресенский, В.Л. Гостюхин, В.М. Максимов, Л.И. Пономарев. – М. : Радиотехника, 2006. – 375 с.

20. GRASP [Электронный ресурс] / TICRA. – Режим доступа: <u>https://www.ticra.com/software/grasp/</u>

21. Логинов, А.А. Метод оценки числа источников излучения в задаче амплитудной моноимпульсной пеленгации / А.А. Логинов, О.А. Морозов, М.Ю. Семенова, В.Р. Фидельман // Известия вузов. Радиофизика. – 2013. – № 7(56). – С. 505–513.

22. Васильев, В.И. Обнаружение аномалий в системах промышленного Интернета вещей на основе искусственной иммунной системы / В.И. Васильев, В.Е. Гвоздев, Р.Р. Шамсутдинов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2021. – Т. 24, № 4. – С. 40-45.

23. Kullback, S. On information and sufficiency / S. Kullback, R.A. Leibler // The Annals of Mathematical Statistics. -1951. - V. 22, No 1. - P. 79-86.

24. Дамбраускас, А.П. Симплексный поиск / А.П. Дамбраускас. – М. : Энергия, 1979. – 176 с.

25. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.

### Основные публикации по теме диссертации

Научные статьи в журналах из перечня ВАК РФ

А1. **Чуманкин, Ю.Е.** Пространственная фильтрация источников сигналов на основе принципа максимума энтропии в задаче пассивной пеленгации с использованием многолучевых антенн / Ю.Е. Чуманкин, О.А. Морозов, В.Р. Фидельман // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2019. – Т. 62, № 2. – С. 147–156.

А2. **Чуманкин, Ю.Е.** Метод оценки изменения направлений главных максимумов диаграммы направленности многолучевой антенны в задаче пассивной пеленгации / Ю.Е. Чуманкин, О.А. Морозов, В.Р. Фидельман // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2022. – Т. 65, № 2. – С. 758–767.

А3. **Чуманкин, Ю.Е.** Применение критерия косинусного рассогласования при учёте наличия рэлеевского шума в задаче моноимпульсной пеленгации [Электронный ресурс] / Ю.Е. Чуманкин, О.А. Морозов // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №12. – Режим доступа: <u>https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.12.17</u>

Доклады в материалах научных конференций и статьи в журналах, включенных в РИНЦ

А4. **Чуманкин, Ю.Е.** Учёт среднего рэлеевского шума в задаче пассивной моноимпульсной пеленгации / Ю.Е. Чуманкин, О.А. Морозов, В.Р. Фидельман // Информационные системы и технологии (ИСТ 2023). Труды научно-технической конференции с международным участием, Самара, 19–21 июня, 2023 года. – Самара : Самарский научный центр РАН, 2023. – С. 99–102.

А5. Морозов, О.А. Нейросетевой подход с использованием энтропии к детектированию выбросов в задаче пассивной пеленгации / О.А. Морозов, **Ю.Е. Чуманкин** // Современные технологии обработки сигналов (СТОС-2023) Доклады 4-ой Всероссийской конференции, Москва, 12–13 декабря 2023 года. М. : Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова – С. 223–226.

А6. Чуманкин, Ю.Е. Использование энтропии и нейронных сетей в задаче детектирования выбросов при пассивной пеленгации / О.А. Морозов, **Ю.Е. Чуманкин** // Нанотехнологии. Информация. Радиотехника (НИР-24) / Материалы Всероссийской молодежной научно-практической конференции, Омск, 18 апреля 2024 года. – Омск : Омский государственный технический университет, 2024. – С. 232–234.

А7. Морозов, О.А. Влияние исключения среднего рэлеевского шума на точность моноимпульсной пеленгации / О.А. Морозов, В.Р. Фидельман, **Ю.Е. Чуманкин** // Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA-2020 Доклады 22-й Международной конференции, Москва, 14–15 апреля 2020 года. – М. : Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2020. – С. 394–397.

А8. Лаврентьева, А.С. Оценка погрешности пеленга, обусловленной отсутствием учета деформации рефлектора антенны / А.С. Лаврентьева,

В.Р. Фидельман, Ю.Е. Чуманкин // Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA-2019 Доклады 21-й Международной конференции, Москва, 27-29 марта 2019 года. – М. : Московское НТО радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2019. – Т. 1. – С. 353–356.

А9. Морозов, О.А. Предварительная селекция сигналов с использованием теоретико-информационного подхода при решении задачи однопозиционной пассивной пеленгации / О.А. Морозов, В.Р. Фидельман, Ю.Е. Чуманкин // Доклады 20-й международной конференции "Цифровая обработка сигналов и ее применение - DSPA-2018", Москва, 28–30 марта 2018 года. – М. : Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2018. – Т. 2. – С. 538–543.

A10. Chumankin, Yu.E. Correction of radiation pattern due to antenna reflector deformation in passive monopulse direction finding problem [Электронный ресурс] / Yu.E. Chumankin, V.R. Fidelyman, O.A. Morozov // Web of conferences. – 2019. – V. 30, № 1. – Режим доступа: <u>https://doi.org/10.1051/itmconf/20193005020</u>

А11. Морозов, О.А. Точность моноимпульсной пеленгации при исключении среднего рэлеевского шума / О.А. Морозов, В.Р. Фидельман Ю.Е. Чуманкин // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. Сборник научных трудов, Севастополь, 6–12 сентября 2020 года. – Севастополь : Севастопольский государственный университет, 2020. – Т. 2. – С. 78–79.

А12. Лаврентьева, А.С. Оценка влияния провисания сетки рефлектора антенны на погрешность пассивного моноимпульсного пеленгования / А.С. Лаврентьева, Ю.Е. Чуманкин, В.Р. Фидельман // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2019) Труды Международной научно-технической конференции, Самара, 24–26 июня 2019 года. – Самара : Самарский научный центр РАН. – С. 595–598.

А13. Морозов, О.А. Оценка смещения главного максимума диаграммы направленности на основе геометрических параметров положения рефлекторной антенны / О.А. Морозов, В.Р. Фидельман, Ю.Е. Чуманкин // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2021): Труды Международной научнотехнической конференции, Самара 24–27 мая 2021 года. – Самара : Самарский научный центр РАН, 2021. – С. 66–70.

А14. Лаврентьева, А.С. Определение параметров диаграммы направленности при сложных деформациях рефлектора зеркальной антенны / А.С. Лаврентьева, О.А. Морозов, **Ю.Е. Чуманкин** // Информационные системы и технологии – 2018. Сборник материалов XXVI Международной научно-технической конференции, Нижний Новгород, 24–28 апреля 2020 года. – Нижний Новгород : Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. – С. 1276–1279.

А15. Лаврентьева, А.С. Корректировка диаграммы направленности антенны в зависимости от величины деформации рефлектора / А.С. Лаврентьева, **Ю.Е. Чуманкин** // Информационные системы и технологии – 2019. Сборник материалов XXV Международной научно-технической конференции, Нижний

Новгород, 19 апреля 2019 года. – Нижний Новгород : Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2019. – С. 36–41.

А16. Лаврентьева, А.С. Исследование изменения параметров диаграммы направленности рефлекторной антенны в зависимости от положения излучателя /, А.С. Лаврентьева, В.Р. Фидельман, Ю.Е. Чуманкин // Информационные системы и технологии ИСТ-2018. Материалы докладов XXIV Международной научнотехнической конференции, посвященной 100-летию Нижегородской радиолаборатории, 20 апреля 2018 года. – Нижний Новгород : Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2018. – С. 100–104.

А17. Расчет диаграммы направленности зеркальной антенны на основе данных о смещениях выделенных точек на поверхности рефлектора / О.А. Морозов, В.Р. Фидельман, А.С. Лаврентьева, Ю.Е. Чуманкин // Труды XXII научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию Нижегородской радиолаборатории. Материалы докладов, Нижний Новгород, 15–29 мая 2018 года. Нижний Новгород : Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2018. – С. 369–372.

А18. Лаврентьева, А.С. Модель учета деформации рефлектора антенны при расчете диаграммы направленности / А.С. Лаврентьева, Ю.Е. Чуманкин // Труды ХХШ научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения Н.А. Железцова, Нижний Новгород, 13–21 мая 2019 года. – Нижний Новгород : Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2019. – С. 356–359.

А19. Морозов, О.А. Алгоритм оценки изменения параметров диаграммы направленности рефлекторной антенны на основе данных о смещении и повороте рефлектора / О.А. Морозов, В.Р. Фидельман, Ю.Е. Чуманкин // Труды XXV научной конференции по радиофизике. Материалы докладов, Нижний Новгород, 14–26 мая 2021 года. Нижний Новгород : Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2021. – С. 134–136.

А20. Морозов, О.А. Алгоритм пассивной моноимпульсной амплитудной пеленгации с использованием оптимизации косинусного рассогласования распределений амплитуд в приёмных каналах / О.А. Морозов, В.Р. Фидельман, Ю.Е. Чуманкин // Труды XXVI научной конференции по радиофизике, посвященной 120-летию М.Т. Греховой: Материалы конференции, Нижний Новгород, 12-27 мая 2022 года. Нижний Новгород : Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2022. - С. 364-366.

# Содержание диссертации

Содержание	2
Введение	4
Глава 1. Корректировка диаграммы направленности рефлекторной антенной системы	17
1.1 Параболические антенные системы	17
1.2 Существующие методы расчёта диаграмм направленности	24
1.2.1 Метод моментов	25
1.2.2 Метод физической оптики	28
1.2.3 Метод физической теории дифракции	33
1.3 Характерные деформации рефлекторов и уточнение диаграмм направленности	4
рефлекторных антенных систем	34
1.4 Описание методики уточнения диаграммы направленности с учётом известных	K
параметров деформации антенной системы	39
1.5 Верификация методики уточнения диаграммы направленности с учётом известных	K
параметров деформации антенной системы	44
1.6 Выводы по первой главе	53
Глава 2. Повышение точности моноимпульсной амплитудной пеленгации	55
2.1 Существующие алгоритмы пеленгации	55
2.1.1 Одномерная пеленгация	56
2.1.2 Двумерная пеленгация	59
2.1.3 Особенности воздействия шума при амплитудной пеленгации	63
2.2 Описание алгоритма пеленгации, учитывающего ненулевое математическое	е
ожидание погрешности амплитуд сигналов	66
2.3 Верификация алгоритма пеленгации, учитывающего ненулевое математическое	е
ожидание погрешности амплитуд сигналов	71
2.4 Повышение вычислительной эффективности алгоритма пеленгации, учитывающего	Э
ненулевое математическое ожидание погрешности амплитуд сигналов	79
2.5 Выводы по второй главе	85
Глава 3. Обработка выбросов в результатах моноимпульсной амплитудной пеленгации	88
3.1 Общая характеристика выбросов в рассматриваемой системе	88
3.2 Существующие методы выявления выбросов	90
3.2.1 Аппаратно-зависимые методы выявления выбросов	91
3.2.2 Алгоритмы углового стробирования	92
3.2.3 Метод выявления выбросов с использованием числа обусловленности	93
3.2.4 Нейронные сети и их применение в задаче пеленгации	95
3.3 Описание алгоритма выявления выбросов, учитывающего энтропию распределения	R
амплитуд	101
3.3.1 Выбор входных параметров	101
3.3.2 Выбор выходного параметра	104
3.3.3 Оценка параметра доверия	107
3.4 Верификация алгоритма выявления выбросов, учитывающего энтропик	3
распределения амплитуд	109
3.5 Выводы по третьей главе	113
Заключение	115
Список литературы	116
· -	