**Плохута Павел Анатольевич. Исследование методов решения некорректных задач многосигнальной радиопеленгации на одной частоте : диссертация ... кандидата технических наук : 05.13.01, 05.12.14 / Плохута Павел Анатольевич; [Место защиты: Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана].- Москва, 2009.- 184 с.: ил. РГБ ОД, 61 09-5/3344**

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

На правах рукописи

**04.2.00 9 6 0 53 5 “**

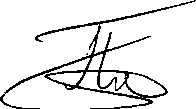
**Плохута Павел Анатольевич**

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ НЕКОРРЕКТНЫХ ЗАДАЧ МНОГОСИГНАЛЬНОЙ РАДИОПЕЛЕНГАЦИИ НА ОДНОЙ**

**ЧАСТОТЕ**

05.13.01 — Системный анализ, управление и обработка информации 05.12.14 - Радиолокация и радионавигация

**Диссертация**



на соискание ученой степени кандидата технических наук

**Научный руководитель:**

д.т.н., профессор A.A. Грешилов

Москва - 2009

Введение 5

**Содержание**

[Глава 1. Методы радиопеленгации и некорректные задачи 13](#bookmark2)

1. [Известные подходы к решению задачи радиопеленгации 13](#bookmark3)
2. [Классический метод формирования пучка 13](#bookmark4)
3. [Метод Кейпона 13](#bookmark6)
4. [Метод MUSIC 15](#bookmark7)
5. [Методы максимума правдоподобия 16](#bookmark8)
6. Основные недостатки известных методов радиопеленгации 17
7. [Некорректные задачи и методы их решения 18](#bookmark10)
8. [Методы решения некорректных задач, основанные на регуляризации 22](#bookmark15)
9. [Регуляризация А.Н. Тихонова 22](#bookmark17)
10. [Регуляризация А.И. Жданова 24](#bookmark18)
11. [Энтропийная регуляризация 25](#bookmark19)
12. Регуляризация посредством ограничения количества итераций 25
13. [Статистическая регуляризация 26](#bookmark22)
14. [*1Х* и *I*-регуляризация 26](#bookmark23)
15. [Выводы 26](#bookmark25)

[Глава 2. Постановка задачи радиопеленгации и методы ее решения 29](#bookmark26)

1. [Общая постановка задачи 29](#bookmark27)
2. [Случай широкополосных сигналов 36](#bookmark34)
3. Рассмотрение задачи радиопеленгации как некорректной задачи 38
4. [*£х* и ^-регуляризация 42](#bookmark39)
5. [Методы определения значения параметра регуляризации 47](#bookmark41)
6. Методы определения оптимального значения параметра *р* 49
7. Моделирование применения метода *Iр* -регуляризации к решению задач многосигнальной радиопеленгации 49
8. [Метод решения некорректных задач, основанный на описании формы сигналов суммой экспонент 53](#bookmark45)
9. [Аналитическое решение для односигнального случая и трехэлементной АС при двухканальном приеме 58](#bookmark53)
10. Выводы 61

[Глава 3. Разработка алгоритмов 63](#bookmark54)

1. Подходы к определению азимутальных и угломестных пеленгов 63
2. [Введение двухмерной сетки 63](#bookmark57)
3. [Оценки в линейной и круговой АС 64](#bookmark58)
4. [Математическое моделирование 67](#bookmark59)
   1. [Обработка сигналов с различной модуляцией 70](#bookmark62)
   2. [Определение количества присутствующих в эфире ПРИ 70](#bookmark63)
   3. [Интервальные оценки результатов 72](#bookmark64)
      1. Учет неопределенностей данных измерений и

математической модели 72

* + 1. [Нахождение дисперсий результатов как дисперсии скалярной функции случайных аргументов 73](#bookmark67)
    2. [Интервальные оценки на основе функции правдоподобия 74](#bookmark68)
  1. Выводы 78

[Глава 4. Практическая реализация разработанных алгоритмов 79](#bookmark71)

1. [Программное обеспечение 79](#bookmark72)
2. [Требования к алгоритмам и их реализация 79](#bookmark73)
3. [Алгоритмы 84](#bookmark75)
4. Алгоритм, основанный на *Iр* -регуляризации 84
5. [Алгоритм, основанный на разложении сигнала на сумму экспоненциальных функций 88](#bookmark78)
6. [Схема проведения эксперимента 91](#bookmark79)
7. [Обработка реальных сигналов 95](#bookmark80)
8. [Односигнальный случай 95](#bookmark81)
9. [Двухсигнальный случай 100](#bookmark85)
10. Односигнальный случай при двухканальном приеме и

наличии амплитудных и фазовых искажений в приемном тракте 105

1. [Рекомендации по обработке сигналов при использовании малоэлементных АС 108](#bookmark91)
2. [Пример работы с многоэлементной АС 109](#bookmark93)
3. [Описание программного обеспечения 111](#bookmark97)
4. [Модернизация пеленгационных комплексов, находящихся в эксплуатации 115](#bookmark99)
5. [Выводы 117](#bookmark102)

[Основные выводы и результаты работы 118](#bookmark103)

[Список литературы 119](#bookmark104)

[Приложение 129](#bookmark105)

[Исходный текст ПО для односигнальной радиопеленгации 129](#bookmark106)

Исходный текст ПО для многосигнальной радиопеленгации на

основе метода *I* -регуляризации 146

Исходный текст ПО для многосигнальной радиопеленгации на

основе метода разложения сигнала на сумму экспоненциальных

функций 162

**Введение**

**Актуальность проблемы.** Многосигнальная пеленгация источников радиоизлучения (ИРИ) имеет место в процессе мониторинга радиоэлектронной обстановки при многолучевом распространении радиоволн, воздействии преднамеренных и непреднамеренных помех, отражениях сигнала от различных объектов и слоев атмосферы [1-4].

Задача пассивной пеленгации ИРИ, работающих на одной частоте, состоит в определении амплитуд сигналов, азимутов (пеленгов) и углов места в выбранной системе координат радиотехническими методами, основываясь на учёте амплитудно-фазовых соотношений между радиосигналами, зарегистрированными некоторой антенной системой (АС). В случае отсутствия у пеленгатора многосигнального режима работы, наличие нескольких работающих на одной частоте ИРИ, приведет к неверному результату, т.к. односигнальный пеленгатор в данной ситуации покажет некий усредненный пеленг.

Радиопеленгатор должен обеспечивать:

1. Возможность пеленгации нескольких ИРИ, работающих на одной частоте, в т.ч. и в случае многолучевого распространения сигнала.
2. Возможность определения количества ИРИ, присутствующих в

эфире, азимутального и угломестного пеленгов каждого ИРИ и

относительных амплитуд излучаемых ими сигналов.

1. Устойчивую работу при низких соотношениях сигнал/шум (8-10 ДБ).
2. Интервальное оценивание параметров ИРИ.
3. Пеленгацию в реальном времени (временной разрыв между

регистрацией сигнала и получением результата не должен

превышать 1 сек.).

Ни один из известных автору пеленгаторов не удовлетворяет полному набору перечисленных требований.

Большинство методов пассивной многосигнальной пеленгации на одной частоте, описанных в литературе, опираются на статистические методы проверки гипотез (В.А. Уфаев, В.Г. Радзиевский), на метод максимума правдоподобия (по существу, метод наименьших квадратов (МНК), A.JI. Дзвонковская, В.П. Денисов, Д.В. Дубинин, М. Wax, Т. Kailath), на различные модификации метода MUSIC (Д.М. Малютов, H. Krim, М. Viberg), на метод *t р* -регуляризации (М. Cetin, Д.М. Малютов) и др. Однако

задача пеленгации ИРИ не может быть надежно решена статистическими методами проверки гипотез, т.к. получаемый результат имеет вероятностный характер. Метод наименьших квадратов (МНК), неприменим для решения рассматриваемой задачи в силу нелинейности и плохой обусловленности систем уравнений. Метод MUSIC и его модификации также имеют ряд ограничений, например, отсутствие учета угломестного пеленга, интервального оценивания параметров. Метод *t* ^-регуляризации

применяется только для линейных АС, и, также, без учета угломестного пеленга и интервальных оценок.

В работах В.Н. Шевченко, Г.С. Емельянова, В.Б. Кригера, Н.М. Иванова, Я.А. Рейзенкинда учитывается угломестный пеленг, но это приводит к увеличению вычислительной сложности методов на несколько порядков за счет введения двухмерной сетки пеленгов.

Поскольку на результаты измерений неизбежно накладывается помеха, а также имеют место ошибки измерений, обусловленные используемой аппаратурой, необходимо иметь не только точечные оценки искомых параметров сигналов, но и оценки их ковариационных матриц или, по крайней мере, дисперсий. Большинство методов решения задачи радиопеленгации, рассмотренных в цитируемой литературе, данных оценок не дают. Задача многосигнальной радиопеленгации как некорректная (при числах обусловленности порядка 107) не рассмотрена в достаточной степени.

Таким образом, остается открытым вопрос о разработке алгоритма многосигнальной пеленгации источников радиоизлучения, работающих на

одной частоте с произвольными видом модуляции и шириной полосы сигнала, для пеленгаторов с пассивными антенными системами, который обеспечивал бы определение азимутальных и угломестных пеленгов ИРИ, относительных амплитуд сигналов, излучаемых ими, с необходимой точностью при малых значениях соотношения сигнал/шум в реальном времени, а также позволял бы определять не только точечные, но и интервальные оценки параметров источников.

**Цель работы.** Целью работы является разработка алгоритмов многосигнальной пеленгации источников радиоизлучения, работающих на одной частоте с произвольными видом модуляции и шириной полосы сигнала, для пеленгаторов с пассивными антенными системами, обеспечивающих высокую надежность оценки параметров ИРИ при соотношениях сигнал/шум, близких к 10-8 дБ, определение количества присутствующих в эфире ИРИ, а также позволяющих получать как точечные, так и интервальные оценки относительных амплитуд, азимутальных и угломестных пеленгов каждого ИРИ.

**Для достижение поставленной цели необходимо решить следующие задачи:**

* на основе метода *I* -регуляризации в совокупности с методом введения

переопределенного базиса и метода представления сигнала в виде суммы экспоненциальных функций разработать алгоритмы . вычисления параметров априори неизвестного количества источников радиоизлучения в условиях малых соотношений сигнал/шум;

* разработать алгоритм вычисления ковариационной матрицы результатов, полученных методом *(. р* -регуляризации, на основе теоремы Крамера-Рао;
* при представлении сигнала в виде суммы экспоненциальных функций, разработать алгоритм учета неопределенностей исходных данных, входящих в математическую модель, которые влияют на оценки параметров ИРИ;
* разработать критерии оценки количества (для малоэлементных АС — критерий оценки единственности) ИРИ, присутствующих в эфире;
* провести математическое моделирование для определения эффективности разработанных алгоритмов;
* разработать программное обеспечение, реализующее алгоритмы многосигнальной радиопеленгации на одной частоте на основе методов *£ р* -регуляризации и представления сигнала в виде суммы

экспоненциальных функций, обеспечивающее оценку азимутального и угломестного пеленгов и относительной амплитуды каждого ИРИ в реальном времени, а также получение ковариационной матрицы (или дисперсий) оценок упомянутых параметров ИРИ;

* осуществить проверку корректности работы разработанного программного обеспечения на реальных данных.

**Методы исследования.** В работе применяется аппарат решения некорректных задач, основанный: 1) на методе *£* -регуляризации (развитие

метода регуляризации А.Н. Тихонова) в совокупности с методом введения переопределенного базиса, и 2) на методе представления сигнала в виде суммы экспоненциальных функций. Применяются методы теории полиномов, математической статистики и корреляционного анализа. Также применяется аппарат многомерной оптимизации, теория алгоритмов ’и программирования.

Базовый аппарат решения некорректных задач изложен в работах А.Н. Тихонова. Метод *£р* -регуляризации изложен в работах М. Cetin и Д.М.

Малютова. Метод представления сигнала в виде суммы экспоненциальных функций - в работах A.A. Грешилова. В совокупности с методом *£ -*

регуляризации для получения интервальных оценок параметров ИРИ применяется теорема Крамера-Рао. Исчерпывающие сведения по теории алгоритмов в изложены в фундаментальном труде Д. Кнута «Искусство программирования». Анализ эффективности упомянутых методов проведен

посредством математического моделирования, проведенного в пакете MATLAB, с привлечением реальных данных, полученных с антенной системы пеленгатора. Разработанное программное обеспечение написано и отлажено в средах Borland Delphi 5 и Microsoft Visual Studio 2005 (язык С).

**Достоверность и обоснованность.** Достоверность и обоснованность предложенного алгоритма определения параметров источников радиосигналов обусловлена корректным применением современного математического аппарата решения плохо обусловленных (некорректных) задач и аппарата многомерной оптимизации. Эффективность предложенного алгоритма подтверждена при помощи математического моделирования и обработки данных, полученных с антенной системы пеленгатора.

**Научная новизна.** Научная новизна состоит в следующем:

* для решения задачи многосигнальной радиопеленгации как некорректной задачи применен аппарат *tp* -регуляризации в совокупности с введением

переопределенного базиса;

* применен метод представления сигнала в виде суммы экспоненциальных функций в комплексной области;
* разработан метод, позволяющий учитывать погрешности всех исходных данных, имеющие место в математической модели, и получать интервальные оценки параметров каждого ИРИ: азимутального пеленга, угломестного пеленга и относительно амплитуды;
* разработаны критерии определения количества (для малоэлементных АС - критерии сигнализации единственности) эквичастотных источников радиоизлучения, присутствующих в эфире, основанные на амплитудных и фазовых соотношениях сигналов, принимаемых элементами антенной

. системы, на невязках между правой и левой частями математической модели, на анализе спектра матрицы системы уравнений для нахождения коэффициентов полинома в методе экспонент;

* создано программное обеспечение, реализующее алгоритмы многосигнальной радиопеленгации на одной частоте на основе методов

-регуляризации и представления сигнала в виде суммы

экспоненциальных функций, обеспечивающее оценку азимутального и угломестного пеленгов и относительной амплитуды каждого ИРИ в реальном времени, а также получение ковариационной матрицы (или дисперсий) оценок параметров ИРИ.

**На защиту выносятся:**

* развитие метода 1р-регуляризации для достижения следующих результатов:

^ работа с круговой АС;

•/ учет угломестных пеленгов;

*^* получение интервальных оценок параметров каждого ИРИ;

* развитие метода представления сигнала в виде суммы экспоненциальных функций для достижения следующих результатов:

возможность применения в комплексной области для решения

задачи многосигнальной радиопеленгации;

получение интервальных оценок параметров каждого ИРИ;

* алгоритм вычисления азимутальных и угломестных пеленгов и относительных амплитуд ИРИ, работающих одновременно на одной частоте, основанный на методе *1р* -регуляризации в комплексе с введением переопределенного базиса;
* алгоритм вычисления ковариационной матрицы решения на основе теоремы Крамера-Рао, применяемой к *I р* -функционалу;
* алгоритм вычисления азимутальных и угломестных пеленгов и относительных амплитуд ИРИ, работающих одновременно на одной частоте, основанный на методе представления сигнала в виде суммы экспоненциальных функций в комплексной области, в совокупности с алгоритмом учета погрешностей исходных данных, входящих в математическую модель;

**и**

* критерии оценки количества (для малоэлементных АС - критерий оценки единственности) присутствующих в эфире источников радиоизлучения;
* программное обеспечение, позволяющее осуществлять многосигнальную радиопеленгацию на одной частоте методами *1р* -регуляризации и

разложения сигнала на сумму экспоненциальных функций в комплексе с проверкой единственности источника радиоизлучения (для малоэлементных АС) или определением количества АС, присутствующих в эфире (для АС с девятью элементами и более), а также позволяющее вычислять интервальные оценки полученных в результате параметров;

* результаты математического моделирования и обработки реальных данных, подтверждающие эффективность разработанных алгоритмов;

**Практическая ценность.** Практическая ценность диссертационной работы заключается в ее прикладной ориентации. Разработанное программное обеспечение может использоваться при разработке, модернизации и ремонте существующих радиопеленгационных комплексов (в т.ч. и с малоэлементными АС). Повышение точности пеленгации, введение нового режима работы «многосигнальная пеленгация» в уже функционирующих изделиях может быть достигнуто только за счет замены программного обеспечения или установки дополнительного вычислителя с отдельным комплектом программного обеспечения. Результаты работы могут быть использованы также для решения некорректных задач в других областях науки и техники: сейсмике, идентификации источников

радиоактивного распада и др.

**Апробация работы.** Основные результаты и положения работы были доложены и обсуждены на:

* Семинаре МГТУ им. Н.Э. Баумана с участием специалистов РЭБ в/ч 21882**;**
* Семинарах кафедры ФН-1 «Высшая математика» МГТУ им. Н.Э. Баумана;
* Семинарах ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт радиотехники»;
* 10-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение», 26-28 марта 2008 г., Москва;
* Восьмом Международном симпозиуме «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ», 30 июня - 4 июля 2008 г., Нижний Новгород;
* Пятой Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике», 26 - 28 января 2009 г., Москва.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано статей - **4,** тезисов докладов - **4,** государственную регистрацию прошли 3 программных продукта.

**Личный вклад соискателя.** Все исследования, изложенные в диссертации, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности. Из совместных публикаций в диссертацию включен лишь тот материал, который принадлежит непосредственно соискателю, заимствованный материал обозначен ссылками.

Основные выводы и результаты работы

1. Разработана модификация метода *£р* -регуляризации, позволяющая

работать с круговой АС и учитывать угломестные пеленги ИРИ и получать интервальные оценки определяемых параметров.

1. Метод разложения сигнала на сумму экспоненциальных функций адаптирован для решения задач многосигнальной радиопеленгации, разработан метод получения интервальных оценок параметров ИРИ.
2. Разработан алгоритм вычисления азимутальных и угломестных пеленгов и относительных амплитуд ИРИ, работающих одновременно на одной частоте, позволяющие уйти от введения двухмерной сетки.
3. Разработаны критерии оценки количества (для малоэлементных АС - критерий оценки единственности) присутствующих в эфире источников радиоизлучения.
4. Проведено математическое моделирование и обработка реальных данных, подтверждающее эффективность разработанных алгоритмов.
5. Разработано программное обеспечение, позволяющее осуществлять многосигнальную радиопеленгацию на одной частоте методами *£* -

регуляризации и разложения сигнала на сумму экспоненциальных функций в комплексе с проверкой единственности источника радиоизлучения (для малоэлементных АС) или определением количества АС, присутствующих в эфире (для АС с девятью элементами и более), а также позволяющее вычислять интервальные оценки полученных в результате параметров.

Список литературы

* Царьков Н.М. Многоканальные радиолокационные измерители. - М.: Советское радио, 1980, 192с.
* Уфаев В.А. Обнаружение сигналов и оценивание их параметров при многоканальном приеме. - М.: МО РФ, 1983, 162 с.
* Радзиевский В.Г., Уфаев В.А. Алгоритмы обнаружения и пеленгования совокупности частотно неразделимых радиосигналов // Радиотехника. —
* -№9.-С. 56-69.
* Артемов М.Л., Дмитриев И.С., Москалева Е.А. Исследование возможности пространственной селекции двух источников

радиоизлучения трехэлементной антенной решеткой // Радиолокация, навигация, связь. Труды 10-й Юбилейной Международной конференции. - Воронеж, 2004. - Т.2. - С. 1378-1382.

* Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Радио и связь, 1982. - 680 с.
* Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. — 3-е изд. перераб. и доп. - М.: Радио и связь, 1989. - 656 с.
* Репин В.Г., Тартаковский Т.П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. - М.: Сов. радио, 1977. - 327 с.
* Борисов О.В., Виноградов А.Д., Уфаев В.А. Синтез алгоритмов пеленгования сигналов с учетом взаимного влияния элементов антенно­фидерной системы // Теория и техника радиосвязи. - 1998. - Вып.2. - С. 89-92.
* Козьмин В.А, Сладких В.А., Токарев А.Б. Различение источников радиоизлучения на основе данных панорамного пеленгования

// Антенны. - 2008. — Вып. 7-8. - С. 92-94.

* Патент РФ № 2263926. Способ пеленгования источника радиосигнала / В.А. Уфаев, А.Д. Виноградов, Ю.И. Маевский, Д.В. Уфаев

// Изобретения. Полезные модели: Официальный бюллетень Российского агенства по патентам и товарным знакам. — 2005. — №12.

* Krim Н., Viberg М. Two decades of array signal processing research. The parametric approach//IEEE Signal Proc. Mag. - 1996.-Vol. 13, no.

1. -P. 67-94.