

Дзвонковская Анна Леонидовна

**ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОМЕРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ В ЗАДАЧЕ
ОЦЕНИВАНИЯ УГЛОВ ПРИХОДА И ЧИСЛА СИГНАЛОВ НА
ОСНОВЕ МЕТОДА МАКСИМАЛЬНОГО ПРАВДОПОДОБИЯ В
УСЛОВИЯХ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ АПРИОРНОЙ
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

**Специальность 05.13.18 –
Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

A handwritten signature is located at the bottom left of the page.

Москва 2003

Работа выполнена на кафедре вычислительной математики и математической физики Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.

Научные руководители:

- доктор технических наук, профессор А.Н. Дмитриенко
- доктор физико-математических наук, профессор Ю.И. Дмитриенко

Офис: 1618025

Дзвонковская А.Л.

Применение

Многомерной оптимизации

в задаче оценивания углов

прихода и числа сигнала...

0-00

2003

на заседании

доктор технических наук, профессор Ю.К. Калинин
доктор физико-математических наук, профессор А.В. Аттегов

Институт радиотехники, электроники
(гет)

5» июня 2003 г. в 11 час. 30 мин.
Д 212.141.15 в Московском госу-
мана по адресу:

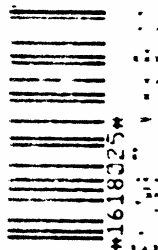
1618025

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

й печатью орга-
Бауманская ул.,

сковского госу-
на.

Волков

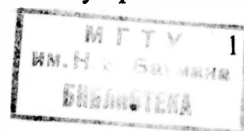


Актуальность проблемы. При пеленговании радиоэлектронных средств в сложной электромагнитной обстановке представляет интерес определение направлений прихода сигналов нескольких источников радиоизлучения, работающих одновременно и независимо в единых диапазонах частот. Современные радиопеленгаторы представляют собой антенно-вычислительные комплексы для измерения пеленгов по азимуту и углу места. Эффективность таких пеленгаторов определяется как вычислительной мощностью аппаратных средств, так и эффективностью используемых математических методов и реализующих их алгоритмов и программ. Повышение эффективности пеленгования требует проведения исследования таких вопросов, как анализ и синтез оптимальных алгоритмов цифровой обработки сигналов, оценка потенциальных характеристик антенной системы (АС) и ряд других вопросов, которые не получили достаточного освещения. Особенно актуальны задачи повышения разрешающей способности и точности радиопеленгации.

В настоящее время в технике наблюдения сигналов и оценки их параметров достигнуты большие успехи. Вопросам статистической теории приема и обработки информации при наличии помех посвящено большое количество работ. За три последних десятилетия разработано много вычислительных методов оценивания параметров сигналов в пассивной локации, которым посвящены работы П.Дж.Д. Гетинга, Т. Кэйлата, М. Уокса, Дж.М. Менделя и др. Отечественными и зарубежными учеными получены существенные результаты, закладывающие фундамент научно обоснованного синтеза и анализа систем в условиях априорной неопределенности, которым посвящены работы Б.Р. Левина, А.Н. Дмитриенко, Ю.И.Абрамовича и др. При решении вопроса приема сигналов в условиях априорной неопределенности были использованы фундаментальные результаты теории вероятности и математической статистики, полученные Г.Крамером, М. Кендаллом и А. Стьюартом, Э. Леманом, Ю.В. Линником и др.

Вместе с тем результаты статистической теории недостаточно эффективно применяются на практике, что обусловлено существованием задач, решение которых отсутствует в явном виде. Поэтому наряду с дальнейшей разработкой теории статистических решений необходимо разрабатывать алгоритмы ее реализации, используя современные вычислительные средства. Это заставляет изыскивать новые пути решения проблемы приема информации, учитывающие статистические свойства различных характеристик передаваемых сигналов и помех.

Оценивание направлений прихода сигналов относится к числу основных задач, решаемых цифровыми системами первичной обработки сигналов современных многоканальных радиотехнических устройств. В



условиях существенной априорной неопределенности, характерной для работы таких устройств, асимптотически эффективные оценки параметров сигналов могут быть получены при использовании метода максимального правдоподобия (МП). Однако алгоритмы МП требуют значительных вычислительных затрат, связанных с задачей многомерной оптимизации. Для уменьшения объема вычислений на практике применяют большое число квазиоптимальных и эвристических алгоритмов (методы Кейпона, MUSIC, ESPRIT и др.), недостатком которых являются интерактивная обработка результатов, неустойчивая работа и недостаточная вычислительная точность в условиях априорной неопределенности. Поэтому остается открытым вопрос о применении численных методов многомерной многоэкстремальной оптимизации в задаче получения совместных оценок углов места и азимутов сигналов на основе метода МП, поскольку в теории статистического синтеза АС вопросы оценивания азимута и угла места чаще всего трактуются как две эквивалентные и независимые между собой одномерные задачи. Актуальным и важным для ряда практических приложений является применение параметрической статистической теории в задаче одновременного оценивания числа сигналов и углов прихода каждого из них.

Целью работы являются разработка оптимального алгоритма оценивания углов прихода (углов места и азимутов) и числа сигналов на основе метода МП в условиях параметрической априорной неопределенности и анализ эффективности оценок углов прихода сигналов.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:

- на основе метода МП разработать алгоритм вычисления МП-оценок углов прихода известного числа сигналов в условиях параметрической априорной неопределенности, используя численные методы многомерной многоэкстремальной оптимизации;
- сформулировать правило выбора решения о числе присутствующих сигналов на основе критерия МП;
- для неизвестного числа сигналов разработать оптимальный алгоритм оценивания углов прихода и числа сигналов в условиях параметрической априорной неопределенности;
- для расчета теоретических предельных точностей оценок углов прихода сигналов аналитически представить элементы информационной матрицы Фишера и сформулировать критерий теоретической предельной разрешающей способности АС по углам места и азимутам;
- провести статистическое моделирование для анализа эффективности оценок углов прихода;
- разработать комплекс программ для реализации оптимального алгоритма оценивания углов прихода и числа сигналов в условиях параметрической априорной неопределенности и провести обработку входной информации, полученной по экспериментальным данным.

Методы исследования. В работе применяется аппарат теории вероятности и математической статистики, элементы теории матриц, численные методы многомерной многоэкстремальной оптимизации, метод статистического моделирования, теория алгоритмов и программирования.

Метод МП, изложенный в работах Г.Крамера, М. Кендалла и А.Стьюарта, использован для разработки оптимального алгоритма оценивания углов прихода и числа сигналов в условиях параметрической априорной неопределенности, решению проблемы которой посвящены работы А.Н. Дмитриенко, Б.Р. Левина. Применены многомерная многоэкстремальная оптимизация с редукцией к одномерным задачам по алгоритмам, рассмотренным в работе Р.Г. Стронгина, и методы локальной многомерной оптимизации, изложенные в работах Д. Химмельблау, Б.Т. Поляка, Г. Реклейтиса. Получение правила выбора решения о числе сигналов основано на многоальтернативной проверке сложных гипотез, изложенной в работах Э. Лемана, Ю.В. Линника. Анализ эффективности оценок углов прихода сигналов проведен на основе метода статистического моделирования с использованием полученных в работе элементов информационной матрицы Фишера в аналитическом виде. Программная реализация разработанного алгоритма оценивания углов прихода и числа сигналов отлажена в средах программирования Borland C++ и системы MATLAB.

Достоверность и обоснованность предложенного оптимального алгоритма оценивания углов прихода и числа сигналов в условиях параметрической априорной неопределенности определяется корректностью применения современного математического аппарата. Непротиворечивость аналитического аппарата и эффективность разработанного алгоритма оценивается путем статистического моделирования.

Научная новизна состоит в следующем:

- впервые при решении задачи оценивания углов прихода и числа сигналов на основе метода МП в условиях параметрической априорной неопределенности применяются численные методы многомерной многоэкстремальной оптимизации;
- используя многоальтернативную проверку сложных гипотез и критерий МП, доказаны теоремы, на основе которых сформулировано правило принятия решения о числе сигналов;
- разработаны оптимальный алгоритм оценивания углов прихода и числа сигналов на основе метода МП в условиях параметрической априорной неопределенности, использующий численные методы многомерной оптимизации и правило принятия решения о числе сигналов, и реализующий алгоритм комплекс программ;
- получены элементы информационной матрицы Фишера в аналитическом виде, на основе которых определяется теоретическая предельная точность оценивания углов места и азимутов для произвольных числа и параметров сигналов, параметров АС и некоррелированных помех;

– сформулирован критерий теоретического предельного разрешения по углам места и азимутам сигналов, использующий теоретические предельные точности оценивания этих углов.

На защиту выносятся:

– алгоритм вычисления МП-оценок углов прихода известного числа сигналов в условиях параметрической априорной неопределенности, использующий численные методы многомерной оптимизации;

– правило выбора решения о числе присутствующих сигналов на основе критерия МП и оптимальный алгоритм оценивания углов прихода и числа сигналов в условиях параметрической априорной неопределенности;

– полученные элементы информационной матрицы Фишера в аналитическом виде, на основе которых определяется теоретическая предельная точность оценивания углов прихода, а также сформулированный критерий теоретического предельного разрешения по углам места и азимутам сигналов, использующий теоретические предельные точности оценивания этих углов;

– результаты статистического моделирования по эффективности оценок углов прихода сигналов, аномальным ошибкам оценивания углов прихода и вероятностям принятия решения о числе сигналов в одно- и многосигнальных ситуациях;

– разработанный комплекс программ для реализации оптимального алгоритма оценивания углов прихода и числа сигналов в условиях параметрической априорной неопределенности.

Практическая ценность диссертационной работы связана с ее прикладной ориентацией. Полученные результаты могут найти применение во многих практических задачах, в которых необходимо провести оценивание параметров сигналов, а также пригодны для аналитических расчетов в инженерной практике. Теоретические выводы могут найти практическое применение при разработке новых радиосистем и повышения эффективности работы существующих.

Реализация и внедрение результатов работы. Полученные в диссертации результаты использованы в плановых научно-исследовательских работах ЗАО НИЦ «НИИДАР-Резонанс», что подтверждено соответствующим актом об использовании, приложенным в диссертации.

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

1. 56-й научной сессии НТОРЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню Радио, г. Москва, 2001;

2. научно-технической конференции профессорско-преподавательского, научного и инженерно-технического состава МТУСИ, г. Москва, 2002;

3. 57-й научной сессии НТОРЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню Радио, г. Москва, 2002;

4. 1-ом Международном радиоэлектронном Форуме «Прикладная радиоэлектроника: состояние и перспективы развития», г. Харьков, Украина, 2002;

5. 5-ой Международной научно-технической конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение», г. Москва, 2003;

6. научно-исследовательских семинарах кафедры «Вычислительная математика и математическая физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ [1-7].

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

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Имеет общий объем 179 страниц, в том числе 122 страницы основного текста, 6 таблиц, 63 рисунка на 38 страницах, 132 наименования списка литературы на 13 страницах, 6 страниц приложения. Кроме этого в конце работы приложен акт об использовании результатов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** к диссертационной работе обоснованна актуальность выбранной темы, сформулирована цель и основные задачи проводимых исследований, приведена структура и краткое содержание работы.

Первая глава носит обзорный характер. В ней рассмотрена математическая модель входной информации, поступающей на алгоритм ее цифровой обработки, которая представляет собой аддитивную смесь сигналов с коррелированными помехами. Проведен обзор современных методов обработки входной информации для оценивания направлений прихода сигналов, включающий квазиоптимальные и эвристические алгоритмы. В условиях параметрической априорной неопределенности эффективным и оптимальным методом является метод МП, на основе которого предлагается проводить оценивание углов прихода сигналов. В заключении главы сформулирована задача диссертационного исследования.

В течение конечного промежутка времени T_0 наблюдается неизвестное число N пеленгуемых пространственно-временных сигналов с неизвестными параметрами, которые принимает АС произвольной конфигурации с M элементами. В данной работе будем предполагать (как это обычно делается при построении радиопеленгаторов), что падающая волна плоская, элементы АС являются ненаправленными, расположенными в одной горизонтальной плоскости, амплитудные коэффициенты передачи трактов

приема сигналов считаем идентичными, фазовые различия трактов приема каналов считаем нулевыми, а взаимное влияние элементов АС отсутствует.

В этом случае выходная информация с M каналов на каждом временном отсчете τ , получаемом дискретизацией времени наблюдения на T временных отсчетов, представляется в виде выборки комплексных амплитуд $\tilde{x}(\tau) \in C^M$ ($\tau=1, 2, \dots, T$) с вектором математических ожиданий $\tilde{s}(\tau; \tilde{\theta}) \in C^M$, при этом каждый элемент вектора $\tilde{s}(\tau; \tilde{\theta})$ зависит от вектора неизвестных параметров

$$\tilde{\theta} = (A_1, A_2, \dots, A_N, \varphi_{n_1}, \varphi_{n_2}, \dots, \varphi_{n_N}, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N) \in \Theta \subset R^{4N},$$

т.е. от амплитуд, начальных фаз и углов прихода (углов места и азимутов) сигналов, где C^n обозначает n -мерное комплексное линейное пространство, R^n обозначает n -мерное действительное линейное пространство.

При этом имеется следующая параметрическая априорная неопределенность (векторы мешающих параметров, не подлежащих оцениванию):

1) $\tilde{A}(\tau) = (A_1(\tau), A_2(\tau), \dots, A_N(\tau))$ - вектор амплитуд сигналов;

2) $\tilde{\varphi}_n(\tau) = (\varphi_{n_1}(\tau), \varphi_{n_2}(\tau), \dots, \varphi_{n_N}(\tau))$ - вектор начальных фаз сигналов;

где $A_k(\tau)$ - амплитуда k -го сигнала, $\varphi_{n_k}(\tau)$ - начальная фаза k -го сигнала ($k=1, 2, \dots, N$).

В указанных условиях априорной неопределенности подлежат оцениванию в априори известных областях

$$D_\beta = \{\beta_k : \forall k \in \{1, 2, \dots, N\} \quad \beta_{\min} \leq \beta_k \leq \beta_{\max}\} \subset R^1,$$

$$D_\theta = \{\theta_k : \forall k \in \{1, 2, \dots, N\} \quad \theta_{\min} \leq \theta_k \leq \theta_{\max}\} \subset R^1$$

векторы информативных параметров $\tilde{\beta} = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N)$, $\tilde{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N)$ соответственно, где β_k и θ_k - угол места и азимут k -го сигнала ($k=1, 2, \dots, N$); $\beta_{\min}$, $\beta_{\max}$ - минимальное и максимальное возможные значения угла места для всех сигналов; $\theta_{\min}$, $\theta_{\max}$ - минимальное и максимальное возможные значения азимута для всех сигналов.

С учетом этих факторов математическая модель входной информации, поступающей на алгоритм ее обработки, может быть представлена как

$$x_m(\tau) = s_m(\tau; \tilde{\theta}) + n_m(\tau), \quad m=1, 2, \dots, M, \quad \tau=1, 2, \dots, T, \quad (1)$$

где $s_m(\tau; \tilde{\theta})$ - сигнальная составляющая, $n_m(\tau)$ - помеховая составляющая.

Сигнальная составляющая представляется в следующем виде

$$s_m(\tau; \tilde{\theta}) = \sum_{k=1}^N A_k(\tau) e^{i(\varphi_{n_k}(\tau) + kd_m \cos \beta_k \cos(\theta_k - \gamma_m))},$$

где γ_m - угол между линией, соединяющей m -ый элемент АС и точку привязки фазы, и линией направления отсчета; d_m - расстояние между точкой привязки фазы и m -ым элементом АС (рис. 1).

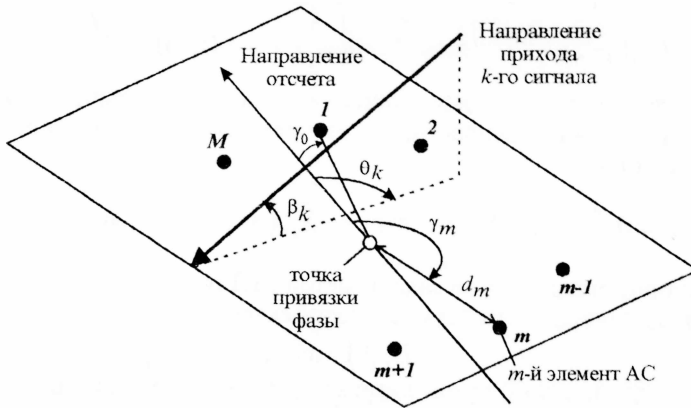


Рис. 1. Пространственное положение элементов АС и углов прихода сигналов

Помеховую составляющую $\tilde{n}(\tau) \in \mathbb{C}^M$ будем полагать стационарной и коррелированной по пространству, а также нормально распределенной с нулевым математическим ожиданием и корреляционной матрицей $\mathbf{K} \in \Xi_{M,M}(\mathbb{C})$, где $\Xi_{m,n}(\mathbb{C})$ обозначает множество матриц размера $m \times n$ с комплексными элементами.

Во второй главе для оценивания информативных параметров сигналов используется метод МП. Это обусловлено тем, что асимптотически этот метод приводит к состоятельным, эффективным и несмещенным оценкам параметров, т.е. является асимптотически оптимальным. При $MT \rightarrow \infty$ совместное распределение вероятностей оценок параметров является нормальным со средними значениями, равными оцениваемым параметрам, и корреляционной матрицей, обратной информационной матрице Фишера $\mathbf{I} \in \Xi_{4N,4N}(\mathbb{R})$, где $\Xi_{m,n}(\mathbb{R})$ обозначает множество матриц размера $m \times n$ с действительными элементами.

Предположим сначала, что число пеленгуемых сигналов априори известно и равно N . Пусть вектор всех параметров $\tilde{\mathbf{g}} \in \Theta$, а вектор только информативных параметров сигналов $\tilde{\mathbf{v}} = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N) \in D_v$, где $D_v = D_\beta^N \times D_\theta^N \subset \mathbb{R}^{2N}$. Оценку информативных параметров $\tilde{\beta}$ и $\tilde{\theta}$ при на-

личии мешающих параметров $\vec{A}$ и $\vec{\Phi}_N$ осуществим путем совместной максимизации функции правдоподобия по всем параметрам $\vec{\Theta}$.

При построении различного типа автоматических измерителей, как правило, используется нормальная модель анализируемых случайных процессов (1), для которых плотность распределения вероятностей имеет вид

$$W(\vec{x}(\tau)|\vec{\Theta}) = (2\pi)^{-M/2} \sqrt{\det \mathbf{K}^{-1}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\vec{x}(\tau) - \vec{s}(\tau; \vec{\Theta}))^* \mathbf{K}^{-1} (\vec{x}(\tau) - \vec{s}(\tau; \vec{\Theta})) \right\}. \quad (2)$$

Тогда функция правдоподобия для независимой выборки объемом T , состоящей из M -мерных векторов, распределенных по нормальному закону (2), имеет вид

$$L_x(\vec{\Theta}) = (2\pi)^{-MT/2} (\det \mathbf{K}^{-1})^{T/2} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{\tau=1}^T (\vec{x}(\tau) - \vec{s}(\tau; \vec{\Theta}))^* \mathbf{K}^{-1} (\vec{x}(\tau) - \vec{s}(\tau; \vec{\Theta})) \right\}.$$

Для рассматриваемой задачи метод МП приводит к следующему выражению для оценивания всех неизвестных параметров:

$$L_x(\vec{\Theta}) \rightarrow \max, \quad \vec{\Theta} \in \Theta. \quad (3)$$

Очевидно, что (3) путем логарифмирования функции правдоподобия $L_x(\vec{\Theta})$ и отбрасывания членов, независимых от параметров, сводится к выражению

$$\sum_{\tau=1}^T (\vec{x}(\tau) - \vec{s}(\tau; \vec{\Theta}))^* \mathbf{K}^{-1} (\vec{x}(\tau) - \vec{s}(\tau; \vec{\Theta})) \rightarrow \min, \quad \vec{\Theta} \in \Theta. \quad (4)$$

Считая помеху стационарной, можем при каждом фиксированном $\tau=1, 2, \dots, T$ выражение (4) свести к T поискам нижних границ вида

$$(\vec{x} - \vec{s}(\vec{\Theta}))^* \mathbf{K}^{-1} (\vec{x} - \vec{s}(\vec{\Theta})) \rightarrow \min, \quad \vec{\Theta} \in \Theta; \quad (5)$$

где при каждом фиксированном временном отсчете τ имеем $\vec{x} = \vec{x}(\tau) \in \mathbb{C}^M$, $\vec{s}(\vec{\Theta}) = \vec{s}(\tau; \vec{\Theta}) \in \mathbb{C}^M$. При этом оценка вектора $\vec{\Theta}$ по всем отсчетам (наблюдениям) есть выборочное среднее вида

$$\hat{\vec{\Theta}} = \frac{1}{T} \sum_{\tau=1}^T \hat{\vec{\Theta}}_{\tau},$$

т.к. метод МП дает асимптотически нормальные оценки параметров, где $\hat{\vec{\Theta}}_{\tau}$ - вектор оценок параметров, полученный из (5) при отсчете τ .

Выражение (5) эквивалентно следующему выражению:

$$\tilde{B}(\vec{x}; \vec{\Theta}) \rightarrow \min, \quad \vec{\Theta} \in \Theta; \quad (6)$$

где $\tilde{B}(\vec{x}; \vec{\Theta}) = \frac{1}{2} \vec{s}^*(\vec{\Theta}) \mathbf{K}^{-1} \vec{s}(\vec{\Theta}) - \operatorname{Re} \{ \vec{x}^* \mathbf{K}^{-1} \vec{s}(\vec{\Theta}) \}.$

Сделав замену

$$\Phi_n = A_n \exp\{j\varphi_{n,n}\}, \quad F_{n,m} = \exp\{j\mu_m \cos\beta_n \cos(\theta_n - \gamma_m)\},$$

где $n=1, 2, \dots, N$ и $m=1, 2, \dots, M$, и вводя матричную функцию неопределенности сигналов $\Psi = F^* K^{-1} F \in \Xi_{N,N}(C)$ и вектор $\vec{Q} = \vec{x}^* K^{-1} F \in C^N$, вместо (6) приходим к выражению

$$\frac{1}{2} \vec{\Phi}^* \Psi \vec{\Phi} - \operatorname{Re} \{ \vec{\Phi}^* \vec{Q} \} \rightarrow \min, \quad \vec{\Phi} \in \Theta. \quad (7)$$

В соответствии с выражением (7) для исключения параметрической априорной неопределенности используем методы, основанные на оценках мешающих параметров. Дифференцируя по мешающим параметрам, получаем систему уравнений МП, которая является системой линейных алгебраических уравнений относительно векторов $\operatorname{Re} \vec{\Phi}$ и $\operatorname{Im} \vec{\Phi}$:

$$\begin{cases} \Psi \cdot \operatorname{Re} \vec{\Phi} = \operatorname{Re} \vec{Q} \\ \Psi \cdot \operatorname{Im} \vec{\Phi} = -\operatorname{Im} \vec{Q} \end{cases}. \quad (8)$$

Из (8) получаем

$$\vec{\Phi} = \Psi^+ \vec{Q}^*,$$

где Ψ^+ - псевдообратная матрица для матрицы Ψ .

Тогда задача оценивания информативных параметров сигналов имеет вид:

$$f(\vec{x}; \vec{v}) = \vec{Q} \Psi^+ \vec{Q}^* \rightarrow \max, \quad \vec{v} \in D_v. \quad (9)$$

Функция $f(\vec{x}; \vec{v})$ является действительной функцией вектора действительных переменных, для которой необходимо найти $2N$ -мерный глобальный максимум (maximum maximum), причем оценки углов прихода сигналов определяются как

$$\hat{\vec{v}} = \arg \max_{\vec{v} \in D_v} f(\vec{x}; \vec{v}).$$

Для задачи поиска глобального максимума функции $f(\vec{x}; \vec{v})$ проводится оптимизационное исследование и предлагается алгоритм вычисления МП-оценок углов прихода сигналов в условиях параметрической априорной неопределенности, использующий численные методы многомерной многоэкстремальной оптимизации.

Особый интерес представляет схема решения задачи (9), редуцирующая многомерные задачи к одномерным. Такая редукция выполняется с помощью кривых (разверток) Пеано, когда отрезок $[0, 1] \subset \mathbb{R}^1$ может быть однозначно и непрерывно отображен на гиперкуб D_v .

Пусть $\vec{v}(y)$, $y \in [0, 1]$, есть непрерывное однозначное отображение отрезка $[0, 1]$ на гиперкуб D_v . Тогда

$$\max_{\vec{v} \in D_v} f(\vec{x}; \vec{v}) = \max_{y \in [0, 1]} f(\vec{x}; \vec{v}(y)),$$

т.е. решение многомерной задачи сводится к поиску максимума одномерной функции. Для одномерного случая, когда точка $y \in [0, 1]$, применяем метод случайного поиска глобального максимума. Используя алгоритм построения пеоноподобной неинъективной развертки, представленный в работе Р.Г. Стронгина, получаем точку глобального максимума, которую уточняем оптимизационным методом комплексов Бокса.

Проведя поиск глобального максимума указанными выше оптимизационными процедурами, получаем вектор значений переменных, которые и являются искомыми оценками информативных параметров.

Следует отметить, что применение указанного выше алгоритма решения задачи многомерной оптимизации позволяет многократно сократить время нахождения глобального максимума по сравнению с методами пассивного перебора на крупной дискретной сетке значений аргументов функции $f(\vec{x}; \vec{v})$ с локальными подъемами к точке экстремума из каждого узла этой сетки, а также с методом многомерного случайного поиска.

В случае неизвестного числа сигналов проводится многоальтернативная проверка сложных гипотез и доказаны теоремы на основе которых, используя критерий МП, сформулировано правило выбора решения о числе сигналов, которое использует полученный алгоритм вычисления МП-оценок углов прихода сигналов с применением многомерной оптимизации.

Правило выбора решения о наличии N сигналов: Если выполняется система неравенств

$$\begin{cases} \max_{\vec{v}^{(N)} \in D_N} f(\vec{x}; \vec{v}^{(N)}) > \max_{\vec{v}^{(j)} \in D_j} f(\vec{x}; \vec{v}^{(j)}) & \text{при } j=1, 2, \dots, N-1, \\ \max_{\vec{v}^{(N)} \in D_N} f(\vec{x}; \vec{v}^{(N)}) \geq \max_{\vec{v}^{(j)} \in D_j} f(\vec{x}; \vec{v}^{(j)}) & \text{при } j=N+1, \dots, N_{\max}, \end{cases} \quad (10)$$

то принимается гипотеза H_N о наличии $N \in \{1, 2, \dots, N_{\max}\}$ сигналов; если нарушено хотя бы одно из неравенств, то эта гипотеза отвергается, где $D_j = D_\beta^j \times D_\theta^j \subset \mathbb{R}^{2j}$, $\vec{v}^{(j)}$ - вектор информативных параметров для j сигналов, $N_{\max}$ - максимально возможное число сигналов.

На рис. 2 представлена блок-схема оптимального алгоритма оценивания углов прихода и числа сигналов на основе метода МП в условиях параметрической априорной неопределенности.

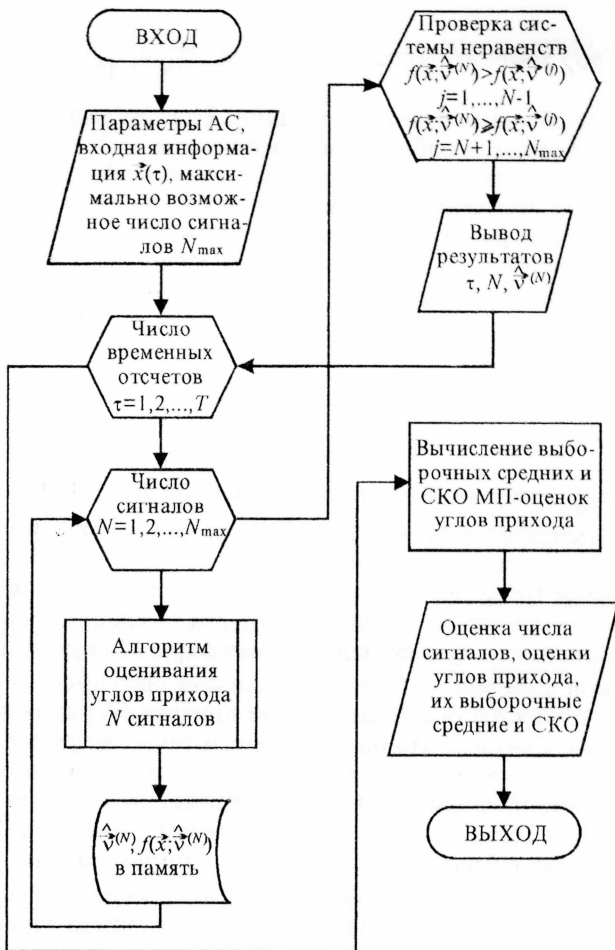


Рис. 2. Блок-схема оптимального алгоритма оценивания углов прихода и числа сигналов в условиях параметрической априорной неопределенности

Теоретические предельные точности оценивания углов прихода определяем как теоретические предельные среднеквадратические отклонения (СКО) оцениваемых параметров сигналов, представляющие собой квадратные корни из диагональных элементов корреляционной матрицы ошибок $\Sigma_0 = \mathbf{I}^{-1} \in \Xi_{4N, 4N}(\mathbf{R})$, где элементы матрицы Фишера имеют вид

$$\mathbf{I}_{n,r} = \mathbf{E} \left\{ \frac{\partial \tilde{\mathbf{B}}(\bar{\mathbf{x}}; \bar{\boldsymbol{\theta}})}{\partial \theta_n} \frac{\partial \tilde{\mathbf{B}}(\bar{\mathbf{x}}; \bar{\boldsymbol{\theta}})}{\partial \theta_r} \right\} = \bar{\mathbf{s}}'_n \mathbf{K}^{-1} \bar{\mathbf{s}}_r^*,$$

$E\{\}$ - оператор математического ожидания, $\vec{s}'_n = \left(\frac{\partial s_1}{\partial \vartheta_n}, \dots, \frac{\partial s_M}{\partial \vartheta_n} \right)$. В случае

независимой выборки $\vec{x}$ элементы матрицы $\mathbf{I}$ для оцениваемых параметров сигналов приведены в работе в аналитическом виде для произвольных числа и параметров сигналов, числа элементов и конфигурации АС.

В качестве критерия разрешающей способности АС принимаем точность, с которой параметры каждого сигнала можно оценить при наличии других сигналов. На основе теоретических предельных точностей оценивания углов прихода предложен критерий теоретического предельного разрешения по углам места и азимутам сигналов, для которого выполняется система неравенств

$$\begin{cases} |\beta_k - \beta_n| \leq \max\{\sigma_{\beta_k}, \sigma_{\beta_n}\}, \\ |\theta_k - \theta_n| \leq \max\{\sigma_{\theta_k}, \sigma_{\theta_n}\}, \end{cases} \quad (11)$$

где σ_{β_k} и σ_{θ_k} - теоретические предельные СКО угла места и азимута k -го сигнала соответственно ($n, k = 1, 2, \dots, N$ и $n \neq k$). При этом система (11) позволяет учитывать корреляцию сигналов.

В третьей главе для анализа эффективности оценок углов прихода проведено статистическое моделирование для различных вариантов параметров одного, двух и трех сигналов, а также круговой эквидистантной АС и независимой выборки $\vec{x}$. При этом показана зависимость теоретических предельных точностей оценивания углов прихода сигналов от отношения сигнал-помеха. Считаем, что оценки асимптотически эффективны, если их относительная эффективность, т.е. отношение теоретических предельных точностей к выборочным СКО оценок соответствующих углов прихода, превышает 90%. Тогда в рассмотренных в работе вариантах получены значения отношения сигнал-помеха q_0 , выше которого можно использовать оценивание углов прихода сигналов на основе метода МП, причем, эти значения зависят от числа и параметров сигналов, числа элементов АС, от величин измеряемых углов. Полученный результат свидетельствует о том, что при отношениях сигнал-помеха $q \geq q_0$ оценки углов места и азимутов можно считать асимптотически эффективными и несмещенными. Один из вариантов расчетов представлен на рис. 3, где линиями 1, 3 и 5 показаны теоретические предельные точности углов прихода первого, второго и третьего сигналов, а линиями 2, 4 и 6 - выборочные СКО оценок углов прихода первого, второго и третьего сигналов соответственно.

Также в главе рассмотрены примеры областей теоретического предельного разрешения по углам места и азимутам сигналов, полученные на основе принятого критерия (11), и их зависимость от параметров сигналов. Для различных вариантов числа и параметров сигналов проведено сравне-

ние оценок углов прихода сигналов, полученных на основе метода МП и метода MUSIC.

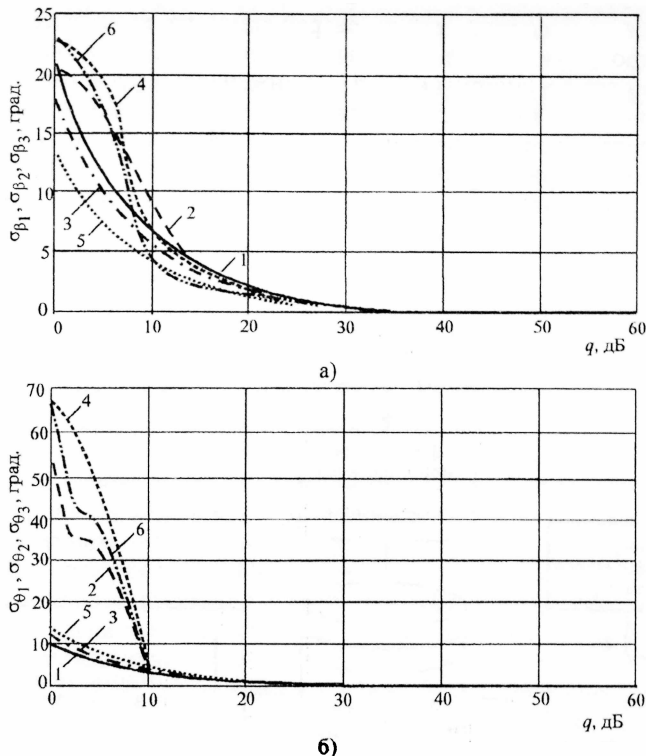


Рис. 3. СКО оценок углов прихода:
а) углов места; б) азимутов

Рассмотрены вероятности аномальных ошибок оценивания углов прихода сигналов, определяемые как $P_a = P\{\forall k \in \{1, 2, \dots, 2N\}: |\hat{v}_k - v_k| \geq 3\sigma_{v_k}\}$, где σ_{v_k} - теоретическое предельное СКО параметра v_k . Ненулевые вероятности аномальных оценок дают смещенность и неэффективность получаемых оценок углов прихода, а их выборочные СКО существенно возрастают по сравнению с теоретическими предельными точностями (см. рис. 3). На основе статистического моделирования приводятся вероятности принятия решений о числе сигналов в одно-, двух- и трехсигнальных ситуациях по системе (10), вычисляемые по свойству классического определения вероятности.

В четвертой главе описан комплекс программ, представляющий программную реализацию алгоритма оценивания углов прихода и числа сигналов в условиях параметрической априорной неопределенности. На рис.4 представлена структурная схема разработанного комплекса программ. Комплекс программ отлажен в средах программирования Borland C++ и современной версии системы научных и инженерных расчетов MATLAB, и позволяет работать как в режиме статистического моделирования, так и в режиме загрузки экспериментальных данных. Используя несколько примеров экспериментальных данных, получены оценки числа присутствующих сигналов и соответствующие этому числу оценки информативных параметров (углов места и азимутов).

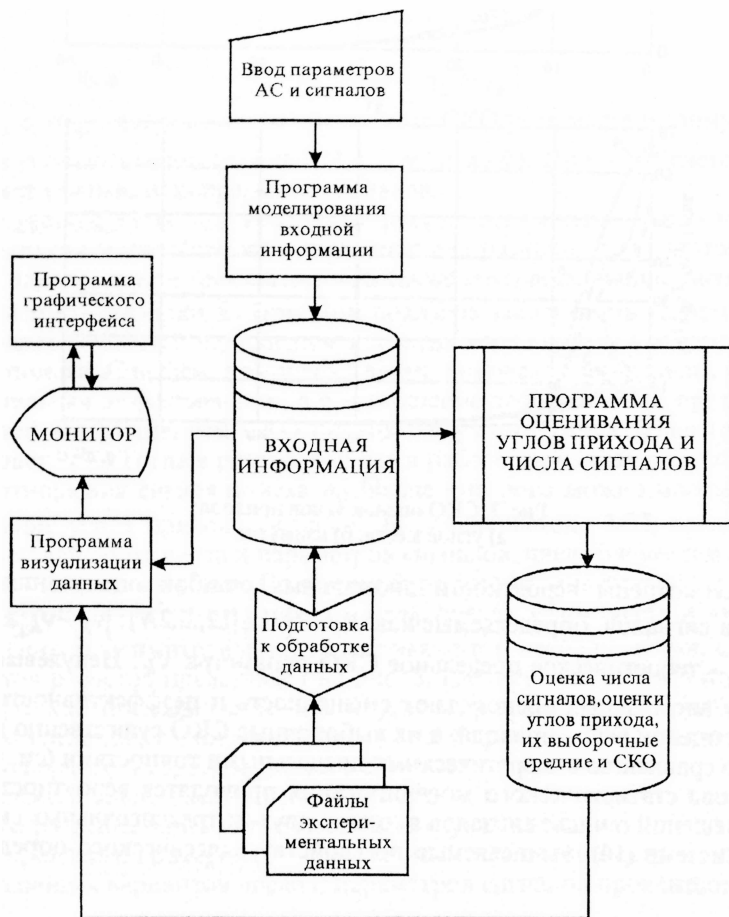


Рис. 4. Структурная схема комплекса программ

Заключение содержит основные выводы и результаты диссертационной работы.

В **приложении** приведены аналитические выражения элементов информационной матрицы Фишера для параметров двух и трех сигналов, круговой эквидистантной АС и независимой выборки комплексных амплитуд.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные новые результаты, полученные в работе:

1. Разработан оптимальный алгоритм оценивания углов прихода (углов места и азимутов) и числа сигналов на основе метода МП в условиях параметрической априорной неопределенности для обработки входной информации, поступающей с элементов АС, расположенных в одной горизонтальной плоскости. Алгоритм использует численные методы многомерной многоэкстремальной оптимизации, включающие редукцию многомерной задачи к одномерной с помощью построения пеоноподобной развертки, одномерный случайный поиск глобального максимума и оптимизационный метод комплексов Бокса.

2. При многоальтернативной проверке сложных гипотез доказаны теоремы, на основе которых, используя критерий МП, сформулировано правило принятия решения о числе присутствующих сигналов, применяемое в полученном оптимальном алгоритме.

3. Для некоррелированных помех получены в аналитическом виде элементы информационной матрицы Фишера для произвольных числа и параметров сигналов, параметров АС. Сформулирован критерий теоретической предельной разрешающей способности АС по углам места и азимутам, использующий теоретические предельные точности оценивания этих углов, рассчитываемые на основе корреляционной матрицы ошибок, обратной информационной матрице Фишера.

4. На основе статистического моделирования показана зависимость эффективности оценок углов прихода сигналов от отношений сигнал-помеха, числа и параметров сигналов, параметров АС. Для одно-, двух- и трехсигнальных ситуаций статистическим моделированием получены вероятности аномальных оценок углов прихода сигналов, наличие которых приводит к смещенности и неэффективности оценок углов прихода сигналов, СКО которых существенно возрастают по сравнению с теоретическими предельными точностями. Показано, что теоретическая предельная разрешающая способность АС ухудшается с уменьшением числа ее элементов, увеличением числа сигналов, уменьшением отношения сигнал-помеха. Для максимально возможного числа сигналов, равному трем, на основе статистического моделирования установлено, что в одно- и двухсигнальной ситуациях вероятность принятия правильного решения о числе сиг-

налов зависит от отношения сигнал-помеха и стремится к единице при его увеличении. В трехсигнальной ситуации при многоальтернативной проверке сложных гипотез выбирается гипотеза о наличии максимально возможного числа сигналов.

5. Разработан комплекс программ, реализующий алгоритм оценивания углов прихода и числа сигналов в условиях параметрической априорной неопределенности и позволяющий работать как в режиме статистического моделирования, так и в режиме загрузки экспериментальных данных, и по экспериментальной входной информации получены оценки числа присутствующих сигналов и соответствующие этому числу оценки углов места и азимутов. Результаты диссертационной работы использованы в научно-исследовательских работах ЗАО НИЦ «НИИДАР-Резонанс», а полученные теоретические выводы позволяют повысить эффективность работы радиопеленгаторов.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Дзвонковская А.Л. Точностные характеристики измерения углов прихода сигнала радиопеленгаторами // LVI научная сессия, посвященная Дню Радио, НТОРЭС им. А.С.Попова: Сб. трудов науч. конф. – М., 2001. - Т. 1. - С. 108-110.

2. Дзвонковская А.Л., Дмитриенко А.Н., Кузьмин А.В. Эффективность измерения углов прихода сигнала радиопеленгаторами на основе метода максимального правдоподобия // Радиотехника и электроника. - 2001. - № 10. - С. 1242-1247.

3. Дзвонковская А.Л. Потенциальные точностные характеристики измерения углов прихода сигналов радиопеленгаторами // Научн.-техн. конф. профессорско-преподавательского, научного и инженерно-технического состава МТУСИ: Тез. докл. – М., 2002. - С. 315-316.

4. Дзвонковская А.Л. Исследование точностных характеристик измерения углов прихода сигналов // LVII научная сессия, посвященная Дню Радио, НТОРЭС им. А.С.Попова: Сб. трудов науч. конф. – М., 2002. - Т.2. - С. 153-156.

5. Дзвонковская А.Л. Измерение углов прихода сигналов на основе метода максимального правдоподобия с многомерной оптимизацией // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития: Сб. трудов 1-го Междунар. радиоэлектронного Форума. – Харьков, 2002. - Ч.1. - С. 128-131.

6. Дзвонковская А.Л., Дмитриенко А.Н. Оптимальные алгоритмы измерения углов прихода сигнала радиопеленгаторами с использованием фазового метода // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Естественные науки. - 2002. - № 2. - С. 84-94.

7. Дзвонковская А.Л. Применение многомерной оптимизации в задаче оценивания числа и углов прихода сигналов на основе метода максимального правдоподобия // Цифровая обработка сигналов и ее применение: Сб. трудов 5-й Междунар. научн.-техн. конф. - М., 2003. - Т.1. - С. 127-130.

**Подписано в печать 05.05.2003г. Заказ № 82г.
Объем 1,0 п.л. Тираж 100 экз.**

Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана