

На правах рукописи

Журавлев Вячеслав Евгеньевич

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ
ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ
В УСЛОВИЯХ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ**

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Ярославль – 2006

Работа выполнена в Ярославском государственном университете им. П.Г. Демидова на кафедре радиофизики

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент
Кренев Александр Николаевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Бережной Евгений Иванович

доктор физико-математических наук
Резников Александр Евгеньевич

Ведущая организация Белгородский государственный
университет

Защита диссертации состоится « » сентября 2006 г. в на
заседании диссертационного совета К 212.002.04 Ярославского
государственного университета им. П.Г. Демидова по адресу: 150000,
г. Ярославль, ул. Советская, д. 14.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ярославского
государственного университета им. П.Г. Демидова.

Автореферат разослан " " августа 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Глызин С.Д.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящий момент происходит бурное развитие радиотехнических систем связи (на конец 2002 г. в эксплуатации находилось более 185 тыс. радиосетей, включающих 9 млн. радиоэлектронных средств), дальнейшие темпы роста отрасли будут определяться работой отраслевых органов государства по регулированию и контролю распределения частотного ресурса.

Постоянно возрастающая интенсивность применения радиоэлектронных средств, активное внедрение цифровых технологий на сетях связи предъявляет к органам государственной радиочастотной службы при Минсвязи России повышенные требования к планированию использования радиочастотного ресурса, совершенствованию технологии подготовки и согласования разрешительных документов на использование радиочастот и обеспечению постоянной эксплуатационной готовности назначенных радиочастот.

Основой для выполнения указанных требований является совершенствование и развитие информационных, расчетно-аналитических и измерительно-пеленгационных систем, в состав которых должны входить стационарные и мобильные пеленгационные комплексы, позволяющие определять координаты источников радиоизлучения (ИРИ) в условиях высокой плотности городской застройки.

Современное состояние системы радиоконтроля не позволяет с достаточной степенью эффективности решать стоящие перед ней задачи. Оснащение пеленгационной техникой региональных Радиочастотных центров – актуальная задача, и этим объясняется повышенный интерес к ее решению. К тому же даже имеющаяся пеленгационная техника не всегда удовлетворяет требованиям качества и функциональности и требует дальнейшей доработки в направлении повышения точности определения координат ИРИ в условиях городского радиоканала.

Задача определения координат ИРИ заключается в расчете координат точки с максимальной вероятностью нахождения в ней ИРИ внутри некоторой области D плоскости XY . Исходными данными для расчета является массив лучей L_{ij} (пеленгов – измеренных радиопеленгатором направлений прихода электромагнитной волны (ЭМВ)), описываемых координатами точки начала луча (x_j, y_j) , $j = 1 \div K$ и углами $\theta_{ij} \in [0; 2\pi)$, $i = 1 \div N_j$ (θ_{ij} – угол между северным направлением и линией луча, отсчитываемый по часовой стрелке (рис. 1)).

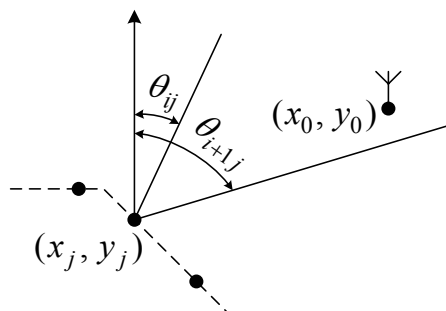


Рис. 1. Исходные данные задачи определения координат ИРИ.

Разработке методов определения координат (МОК) ИРИ посвящены работы И.С. Кукеса, М.Е. Старика, А.А. Ашихмина, А.А. Жукова, В.А. Козьмина, И.А. Шадрина, А.В. Рабцуна. Критический анализ работ посвященных методам определения координат ИРИ и описанию статистики распределения ошибок пеленгов показал, что число таких работ достаточно ограничено. Отсутствие эффективных методов исследования, а, следовательно, и моделей законов распределения ошибок пеленгов, особенно в условиях городского радиоканала (наличия интерференционных помех) сдерживает развитие методов определения координат ИРИ и повышение точности этих методов.

Основной сложностью при создании математических моделей распространения радиоволн является описание распространения радиосигнала в условиях городской застройки. Несмотря на многочисленные результаты исследований по определению характеристик электромагнитного поля при распространении радиоволн в городских условиях полученные Y. Okumura, M. Hata, K. Davidsen, J. Walfisch, F. Ikegami, Н.И Бардиным, Н.Д Дымовичем, Г.З. Рубиным, П.Н. Трифоновым, К. Allsebrook, J.D. Parsons, L.E. Vogler, Ю.В. Лавреньтьевым и др. до сих пор не существует единой методики, позволяющей с высокой степенью достоверности определить значение поля и направление прихода ЭМВ в различных участках радиотрассы.

Отсутствие общепризнанных моделей моделирующих направление прихода ЭМВ в условиях городской застройки не позволяет решить актуальную задачу адекватного сравнения точностных характеристик методов определения координат ИРИ. Проведение сравнения методов по экспериментальным данным требует временных и материальных затрат.

В итоге можно отметить следующее: радиоконтроль является важным элементом в развитии отрасли информационных технологий и связи и в то же время оснащение пеленгационной техникой постов радиоконтроля является недостаточным. Одна из причин – это отсутствие широкого модельного ряда радиопеленгационных средств на отечественном рынке. Так же является актуальной задача повышения точности существующих МОК ИРИ в условиях городской застройки. И при этом в известной литературе

отсутствуют исследования по статистике пеленгов в городском радиоканале.

Для решения поставленных задач требуется: во-первых, разработка математических моделей, описывающих городской канал распространения радиоволн и позволяющих проводить адекватное сравнение и анализ метрологических характеристик существующих и вновь разрабатываемых МОК ИРИ, и во-вторых, разработка МОК, работающих в условиях наличия интерференционных помех (модернизация и доработка уже существующих методов), целью создания которых является повышение точности определения координат.

В связи с вышеизложенным, тема диссертации, посвященная разработке моделей законов распределения ошибок пеленгов в условиях интерференционных помех, повышению точности определения координат ИРИ в городском радиоканале и в частности разработке новых МОК и сравнению метрологических характеристик МОК, является актуальной.

Цели и задачи диссертации

Целью диссертационной работы является повышение точности определения координат ИРИ в условиях сильных интерференционных помех, характерных для городского радиоканала.

Для достижения поставленной цели в диссертации решается задача определения координат источников радиоизлучения. Условия, в которых решается задача, представляют собой городскую среду с высокой плотностью застройки и соответственно многолучевым характером распространения радиоволн (наличием многочисленных переотражений ЭМВ от зданий – интерференционных помех). Исходными данными для расчета местоположения ИРИ является массив лучей (пеленгов) L_{ij} , измеренных мобильным радиопеленгатором при движении по улицам города. При этом задача осложняется тем, что при наличии в точке измерения нескольких ЭМВ с различными направлениями прихода на одной частоте радиопеленгатор измеряет направление прихода результирующей волны (не различает одновременно несколько различных направлений прихода).

Для достижения целей в диссертации решаются следующие задачи:

1. Разработка алгоритма пеленгации в движении и получение экспериментальных данных о статистике отклонений пеленгов от истинного направления на источник излучения в городском многолучевом радиоканале.
2. Построение модели закона распределения ошибок пеленгов, описывающего статистику пеленгов, полученных в условиях наличия интерференционных помех (городском радиоканале).
3. Построение модели радиополигона, описывающей основные характеристики траектории движения мобильного пеленгатора (среднее расстояние до ИРИ и сектор охвата ИРИ).
4. Разработка геостатистического метода (ГМ) определения координат

ИРИ, основанного на расчете координат источника по массиву полученных пленгов и минимизирующего влияние интерференционных помех на точность определения координат ИРИ.

5. Модернизация метода максимального правдоподобия определения координат ИРИ, основанная на расчете координат источника по массиву полученных пленгов и позволяющая использовать его в условиях наличия интерференционных помех.

6. Разработка адаптивного алгоритма выбора оптимальных значений параметров методов определения координат.

7. Проведение исследований зависимости метрологических характеристик МОК от параметров траектории движения пленгатора и статистических характеристик распределений ошибок пленгов методом имитационного моделирования при помощи программного обеспечения, реализующего, построенные модели. Выявление ограничений на условия применимости методов.

8. Определение точности методов определения координат ИРИ по экспериментальным данным, сравнение результатов различных МОК.

9. Выбор наиболее точных методов определения координат ИРИ в условиях наличия интерференционных помех на основе результатов имитационного моделирования и экспериментальных исследований.

Общая методика исследований

Для решения поставленных задач в диссертационной работе широко используется имитационное моделирование, применяются методы теории вероятности и математической статистики. Анализ и сравнение методов определения координат проведены на математических моделях и экспериментальных измерениях.

Разработанные методы определения координат ИРИ ориентированы на применение персональных компьютеров.

Научная новизна результатов

1. Получена математическая модель закона распределения ошибок пленгов при пленгации в движении в условиях наличия интерференционных помех.

2. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработан геостатистический метод определения координат ИРИ.

3. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработана модернизация метода максимального правдоподобия определения координат ИРИ, адаптированная к условиям пленгации при наличии интерференционных помех и распределениях ошибок пленгов, отличающихся от нормального закона распределения.

4. Предложен адаптивный алгоритм выбора оптимальных значений параметров методов определения координат.

5. Разработанные математические модели позволяют провести оценку точности и границы применимости методов определения координат в зависимости от параметров условий пеленгования.

6. На разработанных моделях проведено исследование зависимостей метрологических характеристик методов определения координат ИРИ от параметров условий пеленгования (интенсивности интерференционных помех и параметров движения мобильного пеленгатора).

7. Проведена сравнительная оценка точности определения координат различных методов по экспериментальным данным.

8. В результате исследований на основе имитационного моделирования получен вывод о том, что применение методов радиопеленгации со сверхразрешением в условиях наличия интерференционных помех позволяет повысить точность определения координат ИРИ в 3-5 раз по сравнению с применением классических методов радиопеленгации.

Практическая ценность

Разработанные математические модели радиополигона и закона распределения ошибок пеленгов позволяют в зависимости от параметров условий пеленгации выбрать метод определения координат, имеющий минимальную ошибку.

Предложенные в диссертационной работе геостатистический метод и модернизированный метод максимального правдоподобия при сравнении с существующими методами показывают более высокую точность определения координат ИРИ как на математических моделях, так и на экспериментальных данных. Поэтому методы могут быть применены при производстве пеленгационной техники.

Геостатистический метод определения координат уже используется при производстве мобильных пеленгационных комплексов НПФ «ЯР». Мобильные пеленгационные комплексы с применением геостатистического метода определения координат ИРИ уже эксплуатируются в ряде Радиочастотных центров. На общероссийских соревнованиях 2005 г. между командами Радиоконтрольных пунктов (РКП) второе место заняла команда Ярославского РКП, применявшая мобильный пеленгатор с геостатистическим методом определения координат.

Положения, выносимые на защиту

1. Математическая модель закона распределения ошибок пеленгов, полученных мобильным радиопеленгатором в условиях наличия интерференционных помех.

2. Геостатистический метод определения координат ИРИ.

3. Модернизированный метод максимального правдоподобия определения координат ИРИ.

4. Адаптивный алгоритм выбора оптимальных значений параметров

методов определения координат.

5. Результаты исследования метрологических характеристик МОК ИРИ методом имитационного моделирования.

6. Экспериментальная оценка точности МОК ИРИ в условиях наличия интерференционных помех.

Апробация результатов

Результаты диссертации прошли апробацию на ряде международных и российских конференций и семинаров. Среди них международные научно-технические конференции «Радиолокация, навигация, связь», г. Воронеж, 2002, 2004, 2005гг., Всероссийская научная конференция студентов-радиофизиков, г. Санкт-Петербург, 2001г., Ежегодная областная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Ярославской обл. «Ярославский край. Наше общество в третьем тысячелетии», г. Ярославль, 2003г., Всероссийская научно-техническая конференция «Моделирование и обработка информации в технических системах», г. Рыбинск, 2004г., Всероссийская научно-практическая конференция "Актуальные вопросы разработки и внедрения информационных технологий двойного применения", г. Ярославль, 2004г., научно-технический семинар «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов для связи и вещания», г. Самара, 2005г.

Публикации

Основные результаты диссертации изложены в работах [1-11].

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из оглавления, списка обозначений, введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем составляет 165 страниц, из них 25 страниц приложений, 94 иллюстрации, 18 таблиц, 30 формул.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы и ее практическая значимость, сформулированы цели и задачи исследования, дан критический анализ работ в областях исследований методов радиопеленгации, моделей распространения радиоволн в условиях городской застройки и методов определения координат ИРИ.

В первой главе рассмотрены основные особенности распространения радиоволн в условиях городской застройки, влияющие на ориентацию волнового фронта в пространстве, и соответственно на ошибку измерения направления прихода ЭМВ. Проведен обзор методов описания распространения радиоволн в городской застройке и существующих

математических моделей.

Рассмотрен характер экспериментальных данных на реальных примерах. На рис. 2-5 приведены характерные примеры гистограмм распределения углов лучей θ_{ij} , $i = 1 \div N_j$ на интервале $[0; 2\pi)$, полученных в одной точке (количество лучей N_j варьируется от 10 до 300). Гистограммы условно разделены на четыре типа: 1-ый тип – распределение с ярко выраженным максимумом и СКО от среднего значения менее 10^0 ; 2-ой тип – распределение с ярко выраженным максимумом и СКО от среднего значения более 10^0 ; 3-ий тип – многомодальное распределение; 4-ый тип – распределение близкое к равномерному. Наиболее часто встречаются распределения 4-го типа, затем 3-го, 2-го типов, распределение 1-го типа практически не встречается в условиях городской застройки.

В общем случае описать в явном виде полученные распределения в точках (x_j, y_j) не удастся.

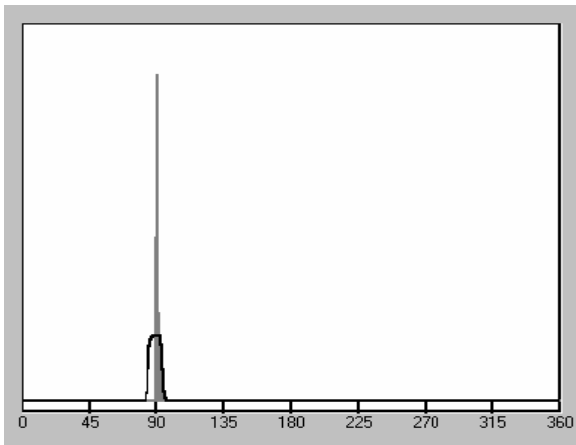


Рис. 2. Гистограмма распределения первого типа.

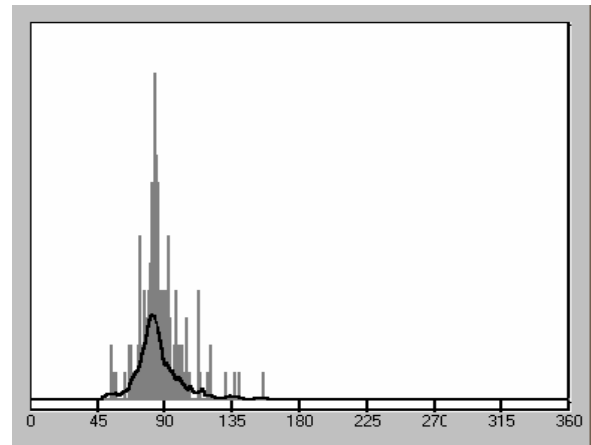


Рис. 3. Гистограмма распределения второго типа.

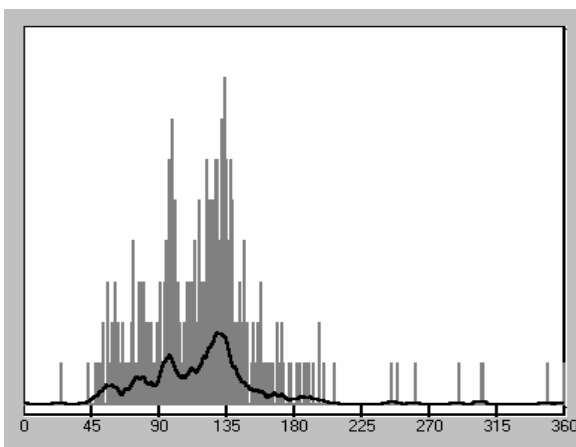


Рис. 4. Гистограмма распределения третьего типа

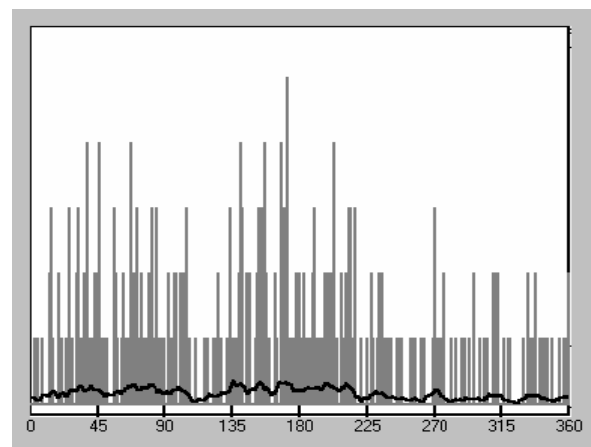


Рис. 5. Гистограмма распределения четвертого типа.

Также рассмотрены распределения разностей углов $\theta_{ij} - \theta_j^{ист}$, где $\theta_j^{ист}$ – угол истинного направления на источник из точки (x_j, y_j) , $i = 1 \div N_j$, $j = 1 \div K$, $N_c = \sum_{j=1}^K N_j$ – общее число лучей L_{ij} . На рис. 6–8 приведены типичные примеры гистограмм разностей углов. Лучи получены в реальной городской среде.

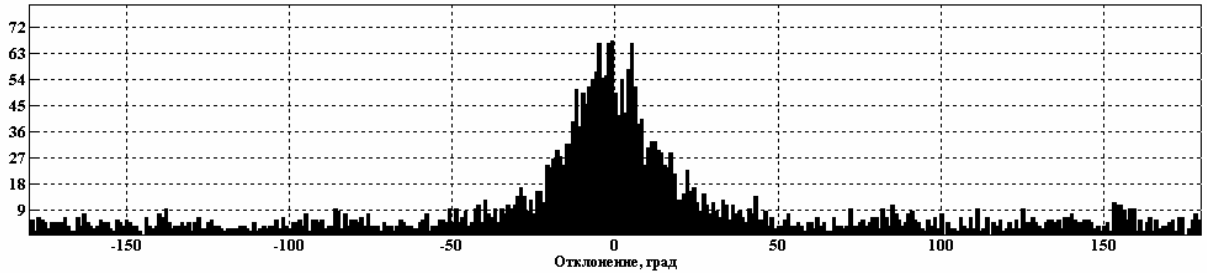


Рис. 6. Гистограмма отклонений углов экспериментальных лучей от истинного направления, $N_c = 3163$.

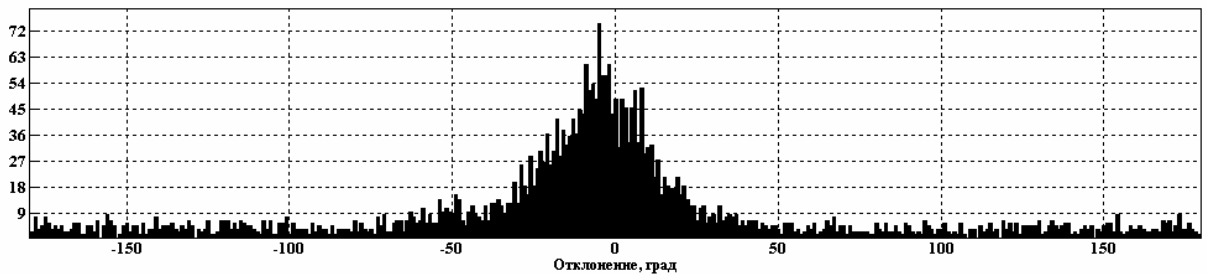


Рис. 7. Гистограмма отклонений углов экспериментальных лучей от истинного направления, $N_c = 3104$.

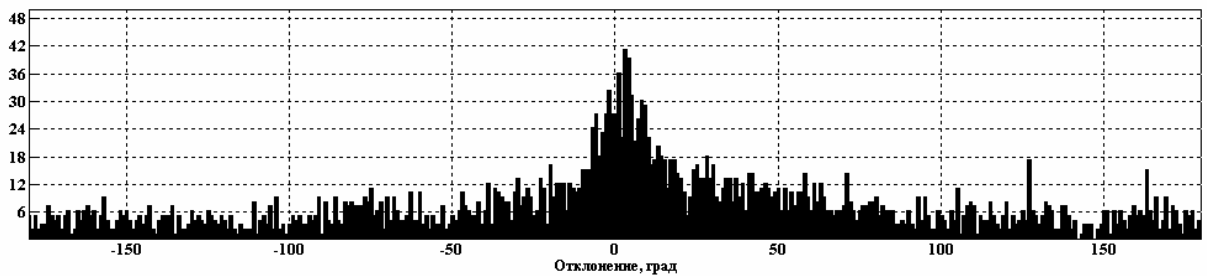


Рис. 8. Гистограмма отклонений углов экспериментальных лучей от истинного направления, $N_c = 2698$.

В результате проведенных исследований экспериментальных данных были сделаны следующие выводы:

- закон распределения пеленгов в точках пеленгования в общем случае не может быть описан нормальным законом распределения (рис. 2-5);
- в условиях городской застройки ошибки пеленгов могут принимать

значения от -180 до 180 градусов и образуют максимум в окрестности нуля (рис. 6-8).

По результатам исследования распределения ошибок пеленгов в городском радиоканале предложена модель закона распределения ошибок пеленгов. В качестве гипотезы закона распределения разностей углов $\zeta(\varphi)$ положена алгебраическая сумма двух независимых законов распределения с весовыми коэффициентами:

$$\zeta(\varphi) = a\xi(\varphi) + (1-a)\eta(\varphi), \text{ где:} \quad (1)$$

φ – угол (отклонение от истинного значения $\varphi = \theta_{ij} - \theta_j^{ист}$), $\varphi \in [-\pi; \pi]$;

$\xi(\varphi)$ – центрированный закон распределения со средним значением $\bar{\varphi}$ и среднеквадратическим отклонением σ_ξ ;

$\eta(\varphi)$ – равномерный закон распределения на интервале $\varphi \in [-\pi; \pi]$;

a – доля разностей лучей, описываемых законом распределения $\xi(\varphi)$, $a \in [0; 1]$.

Из анализа экспериментальных данных (рис. 6–8) центрированное распределение $\xi(\varphi)$ было построено на основе распределение Лапласа, ограниченного на интервале $\varphi \in [-\pi; \pi]$:

$$\xi(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_\xi} e^{-\frac{\sqrt{2}|\varphi-\bar{\varphi}|}{\sigma_\xi}}, \quad |\varphi - \bar{\varphi}| \leq \pi, \text{ соответственно } \eta(\varphi) = \frac{1}{2\pi}.$$

Т.к. $\int_{-\pi}^{\pi} \xi(\varphi) d\varphi = 1 - e^{-\frac{\sqrt{2}\pi}{\sigma_\xi}}$, то центрированный закон распределения

представим в виде $\xi(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_\xi} e^{-\frac{\sqrt{2}|\varphi-\bar{\varphi}|}{\sigma_\xi}} + \frac{1}{2\pi} e^{-\frac{\sqrt{2}\pi}{\sigma_\xi}}$, $\zeta(\varphi)$ представим в

виде: $\zeta(\varphi) = a\xi(\varphi) + (1-a)\eta(\varphi)$, $\varphi \in [-\pi; \pi]$ при этом будет выполнено:

$$\int_{-\pi}^{\pi} \zeta(\varphi) d\varphi = 1.$$

Т.о. параметрами предложенной модели выступают СКО σ_ξ , доля лучей, описываемых центрированным законом распределения a и отклонение среднего значения от нуля $\bar{\varphi}$. При этом $a \in \Gamma = [0; 1]$,

$$\sigma_\xi \in M = \left[\frac{\pi}{180}; 100 \frac{\pi}{180} \right], \quad \bar{\varphi} \in V = \left[-\frac{15\pi}{180}; \frac{15\pi}{180} \right], \quad \Omega = \Gamma \times M \times V.$$

Выбор значения параметров a^* , σ_ξ^* и $\bar{\varphi}^*$ осуществлялся программным

алгоритмом по минимизации параметра критерия согласия χ^2 :

$$\chi^2(a^*, \sigma_{\xi}^*, \bar{\varphi}^*) = \min_{\Omega} \{ \chi^2(a, \sigma_{\xi}, \bar{\varphi}) \}, \text{ где:}$$

$$\chi^2(a, \sigma_{\xi}, \bar{\varphi}) = N_c \sum_{i=1}^r \frac{(v_i - p_i)^2}{p_i};$$

r – число ячеек на интервале $\varphi \in [-\pi; \pi)$;

v_i – эмпирическая частота попаданий значений разности углов в i -ую ячейку;

p_i – теоретическая частота попаданий значений отклонений углов в i -ую ячейку (модели);

N_c – число лучей.

Шаг по параметрам выбран: для a равным 0,01, для σ_{ξ} и $\bar{\varphi}$ равным $\frac{\pi}{180}$.

Проверка адекватности предложенной модели была проведена при помощи критерия согласия χ^2 . Согласно этому критерию, гипотеза отвергается, если величина χ^2 превышает табличное значение, соответствующее выбранному уровню значимости β . Результаты применения критерия согласия к базовой группе экспериментов и параметры соответствующих экспериментальных распределений приведены в табл. 1. При этом было выбрано $r = 15$, и во всех случаях выполняется условие $N_c p_i > 10$. Результаты применения критерия показали, что предложенная модель с достаточной точностью описывает экспериментальные данные.

Таблица 1. Результаты применения критерия согласия χ^2 .

№	N_c	Параметры модели				Табл. знач. χ^2 для значения β		
		σ_{ξ}^* , град	a^*	$\bar{\varphi}^*$, град	χ^2	$\beta = 0,05$	$\beta = 0,01$	$\beta = 0,001$
1	1071	35	0,46	7	18.4	23.70	29.10	36.10
2	2698	32	0,40	6	64.0	23.70	29.10	36.10
3	3163	18	0,56	-1	20.2	23.70	29.10	36.10
4	1081	22	0,58	0	10.3	23.70	29.10	36.10
5	2152	20	0,47	1	48.7	23.70	29.10	36.10
6	2384	98	0,29	-6	12.4	23.70	29.10	36.10
7	2580	42	0,52	-1	22.8	23.70	29.10	36.10
8	3104	21	0,63	-6	17.7	23.70	29.10	36.10
9	1172	22	0,63	0	21.3	23.70	29.10	36.10
10	2101	20	0,67	0	24.6	23.70	29.10	36.10

Во второй главе рассмотрены два класса методов определения направления прихода электромагнитных волн (ЭМВ): классические и со сверхразрешением. Предложен алгоритм пеленгации мобильным комплексом в движении. Показано преимущество мобильной пеленгации в сравнении со стационарной пеленгацией при наличии интерференционных помех. Проведена оценка погрешности вносимой в определение единичного пеленга процессом пеленгации в движении.

Для имитации процесса пеленгации в движении и проведения сравнительного анализа различных МОК разработана математическая модель радиополигона. Геометрия радиополигона приведена на рис. 9. ИРИ располагается в точке с координатами (x_0, y_0) . Траектория движения пеленгатора – сектор окружности радиуса R с центром в точке (x_0, y_0) . На секторе окружности с апертурой Ω равномерно располагаются точки (x_j, y_j) , $j = 1 \div K$. В каждой j -ой точке при помощи модели (1) синтезируется выборка значений пеленгов L_{ij} , $i = 1 \div N_j$. θ_{ij} углы описывающие лучи рассчитываются по следующей формуле:

$$\theta_{ij} = A_{ij}(a)(\alpha_j + \xi_{ij}) + (1 - A_{ij}(a))\eta_{ij}, \text{ где:} \quad (2)$$

α_j – азимут из центра j -го пеленгационного интервала в точку (x_0, y_0) ;

ξ_{ij} – значение случайной величины, имеющей закон распределения $\xi(\varphi)$;

η_{ij} – значение случайной величины, имеющей закон распределения $\eta(\varphi)$;

$A_{ij}(a) = 1$, если угол пеленга описывается распределением $\xi(\varphi)$ и

$A_{ij}(a) = 0$ если угол пеленга описывается распределением $\eta(\varphi)$.

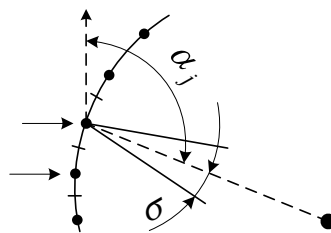


Рис. 9. Геометрия радиополигона.

Параметрами модели радиополигона являются следующие величины:

– количество пеленгационных точек – K ;

– количество пеленгов в пеленгационных точках – N_j ;

– значения радиуса траектории R ;

– сектор дуги окружности траектории – Ω , $\Omega \in [0, 2\pi]$.

Координаты пеленгационных точек (x_j, y_j) определяются

выражениями:

$$x_j = x_0 + R \cos\left(\frac{\Omega}{K} j - \frac{\Omega}{2K}\right), y_j = y_0 + R \sin\left(\frac{\Omega}{K} j - \frac{\Omega}{2K}\right). \quad (3)$$

Предложенная модель радиополигона (3) позволяет проводить анализ зависимости метрологических характеристик МОК от параметров траектории мобильного пеленгатора: расстояния до ИРИ от точек пеленгования R и формы траектории Ω (степени охвата траекторией ИРИ).

Третья глава посвящена МОК ИРИ. Рассмотрены наиболее распространенные методы (метод максимального правдоподобия, матричный метод). Описаны комбинированные методы локализации ИРИ, основанные на последовательном применении различных МОК.

В третьей главе описан геостатистический метод определения координат. Он заключается в синтезе по массиву лучей L_{ij} некоторой функции 2-х переменных, называемой далее поверхностью $\rho_c(x, y)$. Расчетными координатами источника (x'_0, y'_0) считаются координаты глобального максимума полученной поверхности $\rho_c(x'_0, y'_0) = \max_{(x, y) \in \Delta} \{\rho_c(x, y)\}$.

Значение поверхности в произвольной точке $A(x, y)$ рассчитывается следующим образом:

$$\rho_c(x, y) = k \frac{G(x, y)}{S_A}, \text{ где:} \quad (4)$$

S_A – площадь окрестности точки $A(x, y)$, в качестве окрестности точки $A(x, y)$ берется круг с некоторым радиусом r (рис. 10);

k – нормировочный коэффициент;

$G(x, y)$ – поверхность, задаваемая выражением:

$$G(x, y) = \sum_{j=1}^K \frac{1}{d\varphi_j} \int_0^{d\varphi_j} f_j\left(\theta + \varphi_j - \frac{d\varphi_j}{2}\right) d\theta, \text{ поверхность имеет смысл}$$

числа лучей, пересекающих окрестность точки $A(x, y)$;

φ_j – азимут из точки (x_j, y_j) на точку $A(x, y)$ (рис. 10);

$d\varphi_j$ – угловая апертура окрестности точки $A(x, y)$ из точки (x_j, y_j) ;

$$f_j(\varphi) = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} f_{ij}(\varphi) - \text{функция распределения лучей по углам в точке}$$

(x_j, y_j) ;

$$f_{ij}(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{2\sigma_j}} e^{-\frac{\sqrt{2}|\varphi-\theta_{ij}|}{\sigma_j}} + \frac{1}{2\pi} e^{-\frac{\sqrt{2}\pi}{\sigma_j}} \quad - \text{представление каждого луча}$$

L_{ij} непрерывной функцией на всем интервале углов;

σ_j – СКО лучей по выборке в j -ой точке;

$\varphi \in [0, 2\pi)$ – угловая координата.

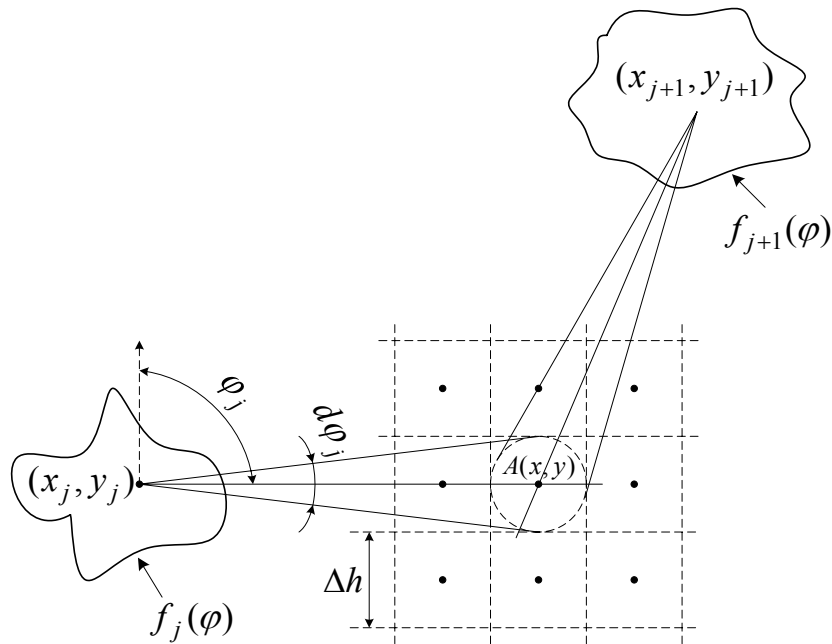


Рис. 10. Расчет матрицы значений $\rho_c(x, y)$.

Поиск глобального максимума поверхности $\rho_c(x, y)$ осуществляется программой реализующей метод прямого перебора по координатам центров ячеек эквидистантной сетки (рис. 10).

В работе предложена модернизация метода максимального правдоподобия определения координат ИРИ, описанного в литературе. Суть метода максимального правдоподобия заключается в следующем. Предполагается, что в каждой точке (x_j, y_j) распределение углов лучей подчиняется нормальному закону распределения и имеет среднее значение θ_j . Тогда для j -ой точки можно записать вероятность нахождения источника по азимуту α_j с апертурой $d\alpha_j$:

$$P_j(\theta_j | \alpha_j) d\alpha_j = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_j}} e^{-\frac{(\theta_j - \alpha_j)^2}{2\sigma_j^2}} d\alpha_j.$$

Аналогичные вероятности можно записать для каждой точки (x_j, y_j) , вероятность нахождения источника внутри области определяемой азимутами α_j с аперттурами $d\alpha_j$, $j = 1 \div K$ будет равна $P(\vec{\theta} | \vec{\alpha}) = \prod_{j=1}^K P_j(\theta_j | \alpha_j) d\alpha_j$.

Координаты источника определяются из условия абсолютного максимума функции правдоподобия $W(\vec{\theta} | \vec{r}) = \prod_{j=1}^K P_j(\theta_j | \alpha_j)$ и могут быть явно выражены.

В реальных условиях метод дает большую ошибку определения координат ИРИ (более 300м). Объясняется это тем, что распределения углов лучей в точках (x_j, y_j) не подчиняются нормальному закону распределения (рис. 2-5) и при вычислении среднего значения по выборке получаются большие ошибки.

Модификация метода заключается в том, что функции $P_j(\theta_j | \varphi_j)$ будем рассчитывать по полученным функциям распределения лучей по углам $f_j(\varphi)$:

$P_j(\theta_j | \varphi_j) d\varphi_j = f_j(\varphi_j) d\varphi_j$, где, как и в случае предыдущего метода:

$$f_j(\varphi) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_j} f_{ij}(\varphi), \text{ и } f_{ij}(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{2\sigma_j}} e^{-\frac{\sqrt{2}|\varphi - \theta_{ij}|}{\sigma_j}} + \frac{1}{2\pi} e^{-\frac{\sqrt{2}\pi}{\sigma_j}}.$$

Далее значения функции $W(\vec{\theta} | \vec{r})$ рассчитываются в узлах эквидистантной сетки (рис. 10):

$$W(\vec{\theta} | \vec{r}) = \prod_{j=1}^K P_j(\theta_j | \varphi_j) = \prod_{j=1}^K \frac{1}{d\varphi_j} \int_0^{d\varphi_j} f_j(\theta + \varphi_j - \frac{d\varphi_j}{2}) d\theta. \quad (5)$$

За расчетные координаты источника (x'_0, y'_0) принимаются координаты глобального максимума функции $W(\vec{\theta} | \vec{r})$, $W(\vec{\theta} | \vec{r})|_{(x'_0, y'_0)} = \max_{(x, y) \in \Delta} \{W(\vec{\theta} | \vec{r})\}$. Глобальная максимизация

осуществляется программой методом прямого перебора значений функции

$W(\vec{\theta} | \vec{r})$ на эквидистантной сетке (рис. 10).

Примеры поверхностей геостатистического метода (ГМ) определения координат ИРИ приведены на рис. 11 и 12, примеры поверхностей модернизированного метода максимального правдоподобия (МММП) приведены на рис. 13 и 14. Источник находится в центре, обозначен зеленой точкой, расчетные координаты обозначены красной точкой.

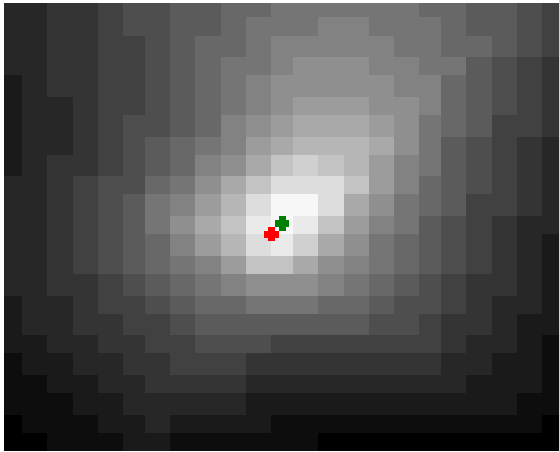


Рис. 11. Пример поверхности ГМ, $\Delta h = 2r = 50,1\text{м}$, ошибка определения координат ИРИ 35,5м.

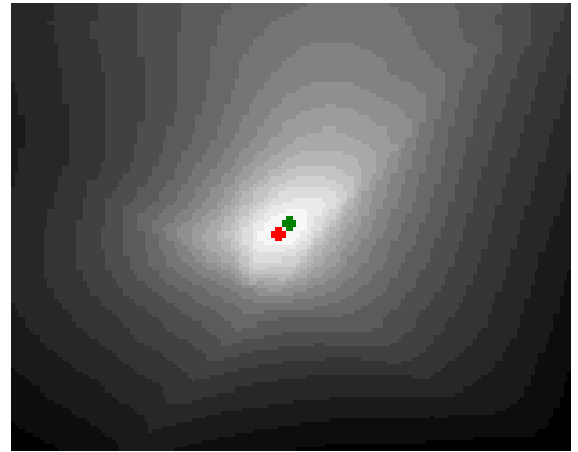


Рис. 12. Пример поверхности ГМ, $\Delta h = 2r = 9,7\text{м}$, ошибка определения координат ИРИ 34,3м.

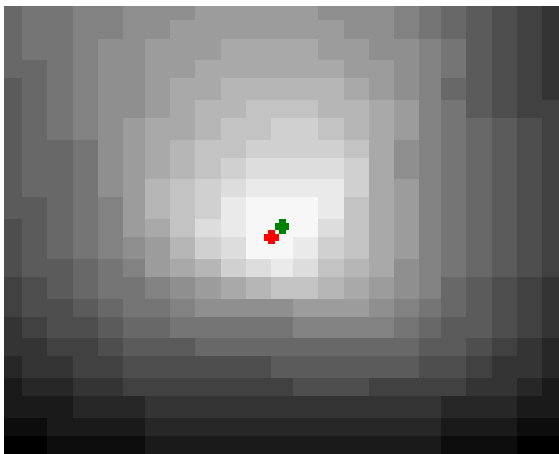


Рис. 13. Пример поверхности МММП, $\Delta h = 2r = 50,1\text{м}$, ошибка определения координат ИРИ 35,5м.

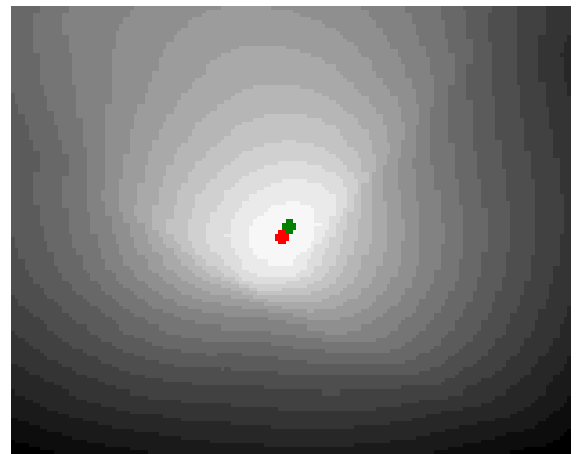


Рис. 14. Пример поверхности МММП, $\Delta h = 2r = 9,7\text{м}$, ошибка определения координат ИРИ 27,8м.

Ошибка определения координат ИРИ рассмотренных методов зависит от радиуса окрестности точки анализа r . Поэтому в работе был синтезирован адаптивный алгоритм выбора значений параметров методов определения координат (МОК) (радиуса окрестности r и СКО σ_j). Схема алгоритма приведена на рис. 15.

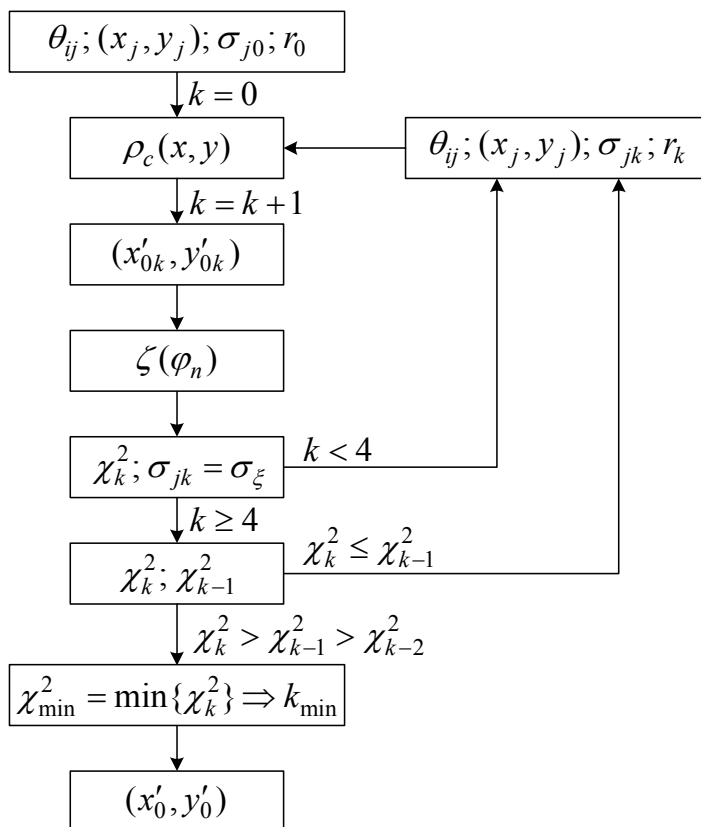


Рис. 15. Схема адаптивного алгоритма выбора оптимальных значений параметров МОК ИРИ.

Алгоритм является итерационным, на первом шаге значения параметров задаются постоянными (σ_0, r_0), на следующих шагах они получают приращения (σ_k, r_k). На каждом шаге рассчитываются координаты ИРИ (x'_{0k}, y'_{0k}), по ним строятся распределения отклонений углов лучей ($\zeta(\varphi_n)$), вычисляются параметры модели ($\sigma_{\xi k}, a_k$ и $\bar{\varphi}_k$), описывающей распределение, и рассчитывается значение параметра критерия согласия χ_k^2 . Критерием выбора значений параметров методов является минимум значения параметра критерия согласия χ^2 .

Предложенные ГМ и МММП определения координат основаны на статистической обработке результатов пеленгации и позволяют минимизировать влияние наличия интерференционных помех на точность определения координат ИРИ.

В четвертой главе приведены результаты исследования зависимости метрологических характеристик МОК в зависимости от параметров радиосигнальной обстановки. Исследования проведены на модели распределения пеленгов (1), (2) и модели радиополигона (3). Построены зависимости величины среднего значения ошибки определения координат

$\bar{d}(r)$, $\bar{d}(\sigma_\xi)$, $\bar{d}(R)$, $\bar{d}(a)$ и $\bar{d}(\Omega)$ от параметров моделей для различных методов. Величина \bar{d} рассчитывалась по формуле:

$$\bar{d} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L d_l = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \sqrt{(x'_l - x_0)^2 + (y'_l - y_0)^2}, \text{ где:} \quad (6)$$

$d_l = \sqrt{(x'_l - x_0)^2 + (y'_l - y_0)^2}$ – ошибка при l -ой реализации модели;

(x_0, y_0) – истинные координаты местоположения ИРИ;

(x'_l, y'_l) – координаты расчетного местоположения ИРИ для l -ой реализации модели, $L = 50$.

Рассмотрено поведение \bar{d} при одновременном изменении параметров σ_ξ , N_u , R и Ω (при $\bar{\varphi} = 0$). На рисунке 16 приведены зависимости $\bar{d}(U_i)$ для различных методов (метода максимального правдоподобия, матричного метода, ГМ и ММП) определения координат, где U_i – совокупности значений параметров модели, приведенных в табл. 2.

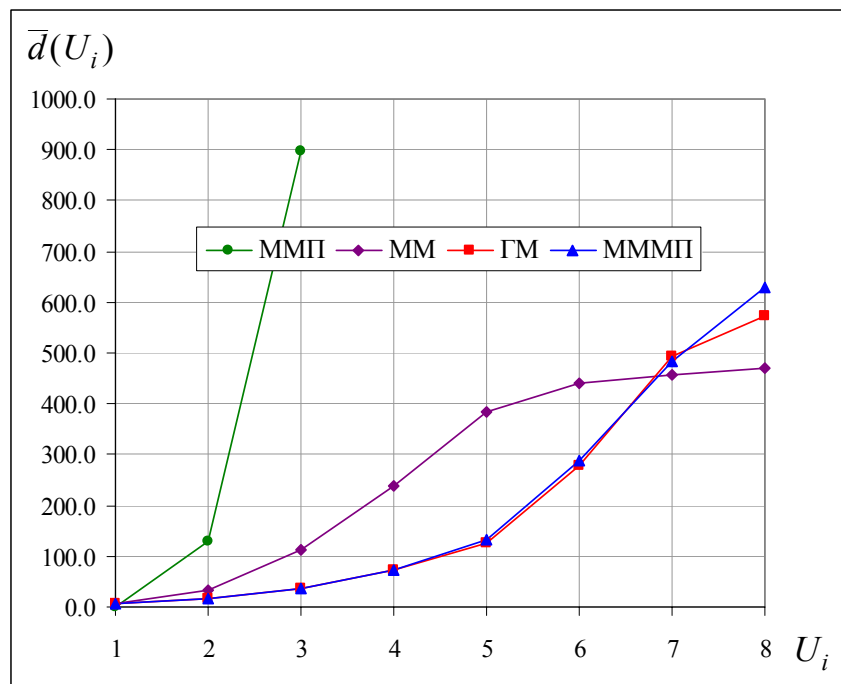


Рис. 16. Графики зависимости $\bar{d}(U_i)$ для различных МОК.

Определены ошибки МОК ИРИ по контрольной группе из 62-х экспериментальных массивов пленгов, проведено исследование адаптивных алгоритмов (АА) на основе геостатистического метода и модернизированного метода максимального правдоподобия, результаты приведены в табл. 3.

Таблица 2. Совокупность значений параметров модели.

U_i	σ_ξ , град	N_u , %	R , км	Ω , град
U_1	1	100	1,0	360
U_2	5	80	2,0	270
U_3	10	60	2,5	180
U_4	15	50	3,0	120
U_5	20	40	3,5	90
U_6	25	30	4,0	60
U_7	30	20	4,5	45
U_8	35	10	5,0	30

Таблица 3. Ошибки МОК по экспериментальным данным.

№	N_c , шт	ММП, d , м	ММ, d , м	ГМ+АА, d , м	МММП+АА, d , м	ММ+ММП, d , м
1	7051	58.3	98.5	42.4	45.3	92.6
2	2529	417.4	253.0	150.3	129.1	347.6
3	3600	584.8	598.9	458.0	448.7	592.7
4	7035	3481.9	330.8	173.6	135.3	586.9
5	5963	464.2	475.9	117.8	164.9	482.6
6	2996	189.2	206.4	15.7	37.8	213.9
7	6864	594.7	60.0	230.8	69.3	46.6
8	1595	406.1	319.0	47.2	315.8	329.6
9	5590	648.7	551.5	242.2	65.7	496.7
10	1263	289.0	90.6	197.2	197.2	233.8
11	5111	600.1	498.9	470.2	531.4	552.9
12	4082	44.9	42.9	28.7	27.8	71.8
13	3353	213.3	64.6	65.3	117.6	217.5
14	4753	896.9	21.8	20.5	14.9	72.6
15	3230	97.0	40.3	98.3	107.6	59.1
16	1405	820.0	41.5	96.7	164.3	56.8
17	1909	118.9	19.9	15.7	15.7	55.7
18	1990	52.8	161.1	23.9	33.1	187.3
19	1971	722.1	54.4	20.6	95.5	39.5
20	2010	47.0	74.1	14.9	23.9	76.7
21	3618	1032.0	354.4	136.4	125.7	392.0
22	1283	1293.0	21.1	28.7	13.5	27.4
23	1667	1178.0	187.7	277.6	802.8	199.3
24	1818	98.1	86.0	101.3	124.1	85.6
25	2071	83.2	54.4	6.9	79.0	51.5
26	2607	808.6	328.3	62.2	249.0	388.1
27	1283	322.5	488.1	98.0	110.2	609.6

№	N_c , шт	ММП, d , м	ММ, d , м	ГМ+АА, d , м	МММП+АА, d , м	ММ+ММП, d , м
28	1516	231.5	208.1	98.0	88.3	230.4
29	1536	317.3	163.1	104.1	110.2	216.6
30	1566	127.9	124.9	77.5	64.1	202.5
31	1576	363.1	439.0	28.7	35.4	434.5
32	1587	544.1	208.1	199.9	189.6	225.5
33	1637	596.4	65.3	99.4	95.3	108.1
34	1667	631.6	560.1	112.9	183.7	576.8
35	1818	236.2	88.3	85.3	135.4	203.0
36	1829	866.0	183.1	113.3	75.3	206.2
37	1859	589.8	544.2	88.9	51.7	555.4
38	1717	1327.5	449.3	55.3	145.9	467.4
39	1768	1277.6	303.4	625.1	660.1	278.4
40	1818	1172.2	23.3	51.7	255.8	68.8
41	1819	258.7	90.6	134.8	148.2	258.5
42	1919	138.3	28.1	70.3	71.7	32.0
43	1919	173.8	54.3	96.7	79.6	46.6
44	1920	195.3	74.1	6.8	5.9	54.6
45	1990	143.0	42.9	42.4	41.2	23.2
46	2000	156.6	74.1	48.9	48.9	11.7
47	2172	171.5	163.0	20.5	75.3	368.8
48	1405	432.6	267.2	28.7	42.4	338.5
49	1809	217.8	590.5	70.3	336.7	618.3
50	1849	387.6	583.9	48.9	105.1	548.1
51	2032	293.4	162.9	35.3	106.0	287.8
52	2314	268.9	74.1	42.4	53.2	83.2
53	2496	217.0	30.9	28.7	59.8	88.3
54	2829	418.9	428.0	682.2	712.4	412.7
55	2749	1245.6	370.4	303.4	352.1	451.0
56	10600	499.9	278.3	6.8	14.9	283.4
57	1293	559.5	544.1	190.4	604.4	558.8
58	2314	375.8	725.2	15.7	15.7	723.6
59	2354	604.3	577.8	94.9	110.2	604.8
60	2566	601.5	623.7	59.8	594.9	619.9
61	2626	608.2	577.8	628.5	656.2	610.8
62	2960	575.8	221.6	21.8	15.7	214.4
\bar{d}		522.4	249.5	157.9	192.4	283.5

Среднее значение ошибки определения координат ИРИ составило:

– для ААГМ – 157,9м;

– для ААМММП – 192,4м.

При этом по критерию Вилкоксона (с достоверностью 0,95) ААГМ дает ошибку меньшую, чем ММ, ММП, ММ+ММП, решить при этом какой из двух методов ААГМ или ААМММП более точен не удастся.

Таким образом, применение адаптивного алгоритма позволяет

определить координаты ИРИ, не зная изначально параметров распределений пеленгов. Однако преимуществом ММ и ММ+ММП является их быстроедействие в силу меньшего числа машинных операций выполняемых в алгоритмах расчета, что дает возможность применять эти методы в режиме реального времени.

Методом имитационного моделирования показано преимущество по точности методов радиопеленгации со сверхразрешением по сравнению с классическими методами радиопеленгации.

В заключении подведены итоги диссертации и показаны направления дальнейшего развития идей, предложенных в работе.

В приложениях приведены таблицы численных значений рассмотренных зависимостей ошибки МОК от параметров моделей. Приведены примеры поверхностей рассмотренных методов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате проведенных в диссертационной работе теоретических и экспериментальных исследований получены следующие основные результаты:

1. Разработан и реализован в программном обеспечении алгоритм пеленгации в движении. Получены экспериментальные данные о статистике отклонений пеленгов от истинного направления на источник излучения в городском многолучевом радиоканале.
2. Построена математическая модель закона распределения ошибок пеленгов для городского радиоканала при пеленгации в движении. Построена модель радиополигона, имитирующая траекторию движения пеленгатора. Модели реализованы в программном обеспечении.
3. Разработан геостатистический метод определения координат ИРИ, ориентированный на применение в условиях наличия интенсивных интерференционных помех. Метод реализован в программном обеспечении.
4. Разработана модернизация метода максимального правдоподобия определения координат ИРИ, адаптирующая метод к условиям наличия интенсивных интерференционных помех. Метод реализован в программном обеспечении.
5. Разработан адаптивный алгоритм выбора значений параметров методов определения координат и реализован в виде программного обеспечения.
6. Проведено исследование зависимости метрологических характеристик МОК от параметров траектории движения пеленгатора и статистических характеристик распределений ошибок пеленгов методом имитационного моделирования при помощи программного обеспечения. Выявлены ограничения на условия применимости различных методов. Определены потенциально достижимые значения ошибки определения координат рассмотренных методов в зависимости от условий пеленгования.

7. Проведено сравнение точности различных методов определения координат ИРИ по экспериментальным данным, показано преимущество разработанных в работе ГМ и МММП. Показана эффективность предложенного адаптивного алгоритма выбора параметров методов определения координат ИРИ.

8. Методом имитационного моделирования показано, что применение методов радиопеленгации со сверхразрешением вместо классических методов радиопеленгации более эффективно с точки зрения минимизации ошибки определения координат ИРИ.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ

ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ

1. Журавлев, В.Е. Разработка и исследование алгоритма определения координат источника радиосигнала для мобильного радиопеленгатора в условиях интерференционных помех / В.Е. Журавлев // V Всерос. науч. конф. студентов-радиофизиков, 11-14 дек. 2001г. : сб. тез. докл. – Санкт-Петербург. – С. 34-37.
2. Захаров, М.Ю. Статистические методы определения координат источника радиоизлучения в условиях интерференционных помех / М.Ю. Захаров, В.Е. Журавлев, Г.Н. Полушкин, А.Н. Кренев // VIII научно-технич. конф. «Радиолокация, навигация, связь», 23-25 апр. 2002 г. : сб. докл. – Воронеж. – Т. 1. – С. 543 - 548.
3. Журавлев, В.Е. Определение координат источников излучения в условиях наличия интерференционных помех / В.Е. Журавлев // Ежег. областная научно-практич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Ярославской обл. «Ярославский край. Наше общество в третьем тысячелетии». : сб. тезисов докл. – Ярославль. – 2003.
4. Ботов, В.А. Сравнительный анализ алгоритмов пеленгации и определения координат источников радиоизлучения в условиях сильной интерференции / В.А. Ботов, В.Е. Журавлев, А.Н. Кренев // X междунар. научно-технич. конф. «Радиолокация, навигация, связь», 12-15 апр. 2004 г. : сб. докл. – Воронеж. – Т. 3. – С. 2148-2155.
5. Ботов, В.А. Экспериментальные исследования распределения пеленгов в городском радиоканале / В.А. Ботов, В.Е. Журавлев, А.Н. Кренев, Г.Н. Полушкин // Всерос. научно-технич. конф. «Моделирование и обработка информации в технических системах», 25-27 мая 2004 г. : материалы – Рыбинск. – С. 269 -273.
6. Карпов, А.А. Моделирование работы мобильного пеленгационного комплекса в условиях города / А.А. Карпов, В.А. Ботов, В.Е. Журавлѐв, А.Н. Кренѐв // V Всерос. научно-практич. конф. "Актуальные вопросы разработки и внедрения информационных технологий двойного

- применения", 18-20 нояб. 2004 г. : тезисы докл. – Ярославль. – С. 44-46.
7. Ботов, В.А. Исследование методов определения координат источников радиоизлучения для мобильной радиопеленгации на модели радиосигнальной обстановки / В.А. Ботов, В.Е. Журавлёв, А.Н. Кренёв // XI междунар. научно-технич. конф. «Радиолокация, навигация, связь», 12-14 апр. 2005 г. : сб. докл. – Воронеж. – Т. 2. – С. 1096-1102.
 8. Ботов, В.А. Оценка точности определения координат ИРИ при пространственной обработке сигналов в радиоканале с сильной интерференцией / В.А. Ботов, В.Е. Журавлев, А.Н. Кренев // Научно-технич. семинар «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов для связи и вещания», 27-28 июня 2005 г. : сб. материалов – Самара. – С. 123-127.
 9. Ботов, В.А. Модель распределения пеленгов в городском радиоканале / В.А. Ботов, В.Е. Журавлев, А.А. Карпов // «Актуальные проблемы физики». : сб. науч. тр. молодых ученых, аспирантов и студентов / Яросл. гос. ун-т. – Ярославль. – 2005. – Вып. 5. – 307с.
 10. Ботов, В.А. Сравнительный анализ комбинированных методов определения координат источников радиоизлучения / В.А. Ботов, В.Е. Журавлев // «Актуальные проблемы физики». : сб. науч. тр. молодых ученых, аспирантов и студентов / Яросл. гос. ун-т. – Ярославль. – 2005. – Вып. 5.– 307с.
 11. Ботов, В.А. Сравнительный анализ методов определения координат источников радиоизлучений / В.А. Ботов, В.Е. Журавлев, А.Н. Кренев // Радиотехника. – 2006. – №2. – С. 28-32.