

05.13.18

Б903

На правах рукописи

Контрольный
экземпляр

Будуев Денис Владимирович

ОДНОПУНКТОВАЯ СИСТЕМА ПАССИВНОГО МОНИТОРИНГА
ГРОЗОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ
(модели, методы, программное обеспечение)

Специальность 05.13.18 – «Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск
2004

Работа выполнена в Южно-Уральском государственном университете.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук,
профессор Панюков А.В.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
старший научный сотрудник Мокеев В.В.;
доктор технических наук,
профессор Родионов В.В.

Ведущая организация – Всероссийский научно-исследовательский
институт технической физики Российского
федерального ядерного центра
им. академика Е.И. Забабахина.

Защита диссертации состоится 15 сентября 2004 г., в 14 часов, на заседании диссертационного совета Д212.298.02 в Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЮУрГУ.

Ваш отзыв, заверенный печатью, просим выслать по адресу:
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ, ученый совет.

Автореферат разослан 2 июня 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



Чернявский А.О.

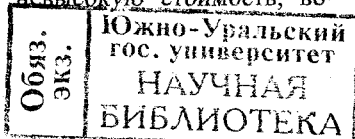
Общая характеристика работы

Актуальность темы. В настоящее время наблюдение грозовой обстановки наиболее часто осуществляется многопунктовыми системами, основанными на мониторинге электромагнитного поля Земли в СДВ и УКВ диапазонах (NLDN в США, SAFIR в Зап. Европе).

Данные системы, прежде всего, разрабатывались для метеорологического обеспечения полетов в авиации и космонавтике, для локализации аварий и отключений ЛЭП, вызванных грозой (40–65% случаев). Вследствие интенсивного развития пассивных многопунктовых систем местоопределения молниевых разрядов, предоставляемая ими информация о грозовой активности стала доступной для менее крупных потребителей. В производстве указанные системы используются для предупреждения персонала, проводящего наружные работы, для принятия мер по временной грозозащите объектов. В страховом деле — для подтверждения факта удара молнии, а также для определения страховой суммы с учетом многолетней статистики грозоактивности в данном районе. Интересным примером, свидетельствующим о высокой научно-технической разработанности данных систем, является их применение в сфере телекоммуникаций, где ежеминутная информация о грозовой активности позволяет автоматически перенаправлять потоки данных, минуя коммуникационные узлы, находящиеся в зоне грозовой активности, а также автоматически обесточивать критические узлы сети связи. Применение данных систем не ограничено прикладными областями, но также связано с решением актуальных проблем таких областей фундаментальной науки как геология, метеорология, физика атмосферы.

К недостаткам многопунктовых систем следует отнести высокую стоимость, необходимость иметь массовые коммуникационные сети, обеспечивающие обмен информацией между разнесенными пунктами, а также средств синхронизации с сетью единого времени.

В России, где испытывался недостаток в повсеместно развитых и доступных системах связи, наибольшее внимание уделялось разработкам однопунктовых грозоуловителей-дальномеров. К достоинствам однопунктовых систем определения местоположения молниевых разрядов относятся, во-первых, более простое по сравнению с многопунктовыми системами техническое исполнение, что обуславливает их относительно невысокую стоимость, во-вторых, автономность и мобильность.



Задача местоопределения молниевых разрядов состоит в локализации источника электромагнитного поля по результатам наблюдения в некоторых точках и относится к классу обратных задач. Основная сложность при локализации источника из одной точки заключается в построении устойчивых (т.е. малочувствительных к погрешностям моделирования) алгоритмов.

К настоящему времени в России разработано несколько серийных приборов. Грозодальномер ФАГ-1, основанный на фазовом одночастотном Н-методе пеленгации, обеспечивает интервальную оценку дальности в диапазоне расстояний 0–70 км с шагом 10 км. Грозопеленгатор-дальномер "Очаг-2П", основанный на широкополосном ЕН-методе, показал возможность применения однопунктовых систем, однако из-за невысоких точностных и вероятностных характеристик широкого применения не получил. Причиной этого явилась принятая при разработке этой системы гипотеза о вертикальности эквивалентного дипольного источника излучения, предопределившая высокую погрешность определения координат разряда.

Более адекватной моделью задачи местоопределения молниевых разрядов является задача определения координат точки размещения произвольно ориентированного электрического диполя, размещенного над бесконечно проводящей плоскостью, по результатам однопунктового наблюдения индуцируемого им электромагнитного поля. Данный факт имеет теоретическое обоснование [1] и подтвержден многочисленными практическими экспериментами, проведенными ГТО им. А.И. Воейкова.

Стремительное развитие цифровой техники дает новые возможности реализации систем и алгоритмов однопунктового местоопределения молниевых разрядов. Однако многочисленные попытки получения устойчивых алгоритмов местоопределения произвольно ориентированного электрического диполя оказались неудачными. Наиболее подходящим можно считать прямой метод [2]. Данный метод был выведен в предположении, что в уравнениях математической модели задачи имеют место точные равенства. В силу неидеальности моделей и наличия шумов в наблюдаемых сигналах, приходится допускать наличие невязок в уравнениях математической модели. Поэтому, с интуитивной точки зрения, целесообразно попытаться применить принцип наименьших квадратов для минимизации невязки. Кроме того, для применения прямого метода необходимо использовать всю временную область, в которой сигнал от источника излучения отличен от нуля. Это не позволяет, в частности, исследовать влияние ионосферы на значения измеряемых параметров.

Цель и основные задачи диссертационной работы. Целью работы является разработка однопунктовой СДВ системы местоопределения молниевых разрядов, которая по сравнению с аналогами, во-первых, использует более адекватную модель задачи, во-вторых, имеет более высокие точностные характеристики определения дальности до молниевых разрядов, в-третьих, дает гарантированные оценки угловых координат эквивалентного диполя.

В связи с поставленной целью решаются следующие задачи:

1. Анализ методов однопунктового определения дальности до молниевых разрядов.
2. Исследование применения принципа наименьших квадратов для минимизации невязки в уравнениях модели задачи.
3. Анализ и выбор средств реализации.
4. Выработка требований к аппаратному обеспечению.
5. Разработка программного обеспечения грозопеленгатора-дальномера.
6. Проведение лабораторных и полевых испытаний разработанного программного обеспечения в составе грозопеленгатора-дальномера.

Методы исследования. Для исследования применяются методы математического анализа, имитационного моделирования на ЭВМ, цифровой обработки сигналов.

Научная новизна состоит в следующем:

1. Разработан и численно исследован экстремальный параметрический метод определения дальности до молниевых разрядов в ближней зоне (до 100 км), основанный на импульсном электромагнитном методе и реализующий принцип наименьших квадратов для минимизации невязки в уравнениях исходной математической модели задачи, который в отличие от известных экстремальных методов является робастным.
2. Реализована библиотека методов однопунктового определения дальности до молниевых разрядов, содержащая, в том числе эффективную реализацию экстремального параметрического метода.
3. Создана система имитационного моделирования на ЭВМ молниевых разрядов в ближней зоне.
4. Предложен способ проверки влияния ионосферы на адекватность математической модели задачи, основанный на данных натурного эксперимента.
5. Разработана структура аппаратной части системы однопунктового определения дальности в СДВ диапазоне до молниевых разрядов в ближней зоне. Реализована программная часть системы.

6. Разработаны цифровые методы предобработки регистрируемых сигналов.

Связь работы с государственными и международными программами. Работа выполнена при поддержке конкурсного центра по грантам в области энергетики и электротехники Минобразования РФ (грант номер 45Гр-98, номер гос. регистрации отчета 01.980006959), Российского фонда фундаментальных исследований (проект 01-07-90161), Международного научно-технического центра (проект 1822).

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанный экстремальный параметрический метод; программное обеспечение однопунктовой системы определения дальности до молниевых разрядов; методы цифровой предобработки сигналов используются в грозопеленгаторе-дальномере нового поколения, разрабатываемом в Российско-американском проекте.

Апробация работы. Основные результаты и положения работы докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

- 5-ая национальная конференция по атмосферному электричеству, Владимир, сентябрь 2003 г.
- международная конференция ICLP-2002, Краков, сентябрь 2002 г.
- всероссийская научная конференция “Компьютерное и математическое моделирование в естественных и технических науках”, Тамбов, май 2002 г.
- международный конгресс “Молодежь и Наука – третье тысячелетие”, Москва, апрель 2002 г.
- конференция Ассоциации математического программирования, Екатеринбург, февраль 1999 г.
- Всероссийский симпозиум по прикладной и промышленной математике, Йошкар-Ола, декабрь 2001 г.
- ежегодных научно-технических конференциях ЮУрГУ.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 8 работ. В их числе: зарегистрированных программ для ЭВМ – 1; статей в журналах РАН – 1; статей в сборниках Минобразования – 2; тезисов докладов – 4.

Структура работы. Диссертация состоит из Введения, трех глав, Заключение, списка литературы (43 наименования) и трех приложений, изложенных на 125 страницах, 29 рисунков.

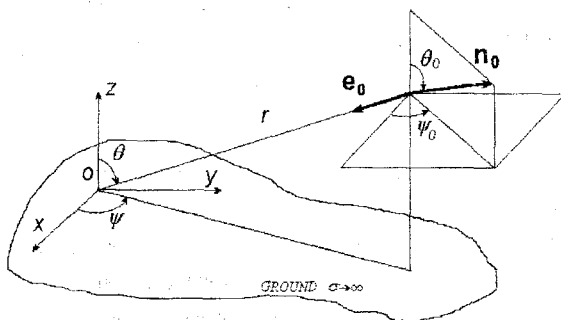


Рис. 1. Геометрические параметры задачи

Основное содержание работы

Во Введении обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулирована цель работы, кратко охарактеризована научная новизна и практическая значимость полученных результатов, их апробация, отмечена связь проблемы с планами научных исследований, приведены сведения о расположении материала по разделам работы.

Первая глава работы посвящена анализу некоторых методов определения дальности до молниевых разрядов, моделью которого является произвольно ориентированный электрический диполь, размещенный над бесконечно проводящей поверхностью (рис.1).

Такая модель вполне адекватно описывает молниевый разряд и подстилающую поверхность при использовании для измерений диапазона СДВ (длина волны не меньше 100 км).

Ортогональные проекции компонент поля, индуцируемого в точке O электрическим диполем, составляют

$$E_z(t) = \left(q(t) + q'(t) \frac{1}{\alpha} \right) \cdot (3u - 2v) + q''(t) \frac{u}{\alpha^2}, \quad (1)$$

$$H_x(t) = \sin \varphi \left(q'(t) \frac{1}{\alpha} + q''(t) \frac{1}{\alpha^2} \right), \quad (2)$$

$$H_y(t) = -\cos \varphi \left(q'(t) \frac{1}{\alpha} + q''(t) \frac{1}{\alpha^2} \right), \quad (3)$$

$$E_x(t) = E_y(t) = H_z(t) = 0.$$

Здесь $\alpha = c/r$ – величина, обратная времени распространения волны от источника до точки O , переменные $u, v, \varphi, q(t)$ определяются равенствами:

$$w \sin \varphi = \sin \theta \cos \theta_0 \sin \psi - \cos \theta \sin \theta_0 \sin \psi_0,$$

$$-w \cos \varphi = -\sin \theta \cos \theta_0 \cos \psi + \cos \theta \sin \theta_0 \cos \psi_0,$$

$$u = \sin \theta \cos(\varphi - \psi), v = \frac{\sin(\varphi - \psi_0)}{\sin \theta \sin(\psi - \psi_0)}, q(t) = \frac{w \alpha^2 p(t)}{(2\pi c^2 r)}.$$

$p(t)$ – дипольный момент источника излучения. Компоненты $E_z(t)$, $H_x(t)$ и $H_y(t)$ могут быть измерены с помощью антенной системы, состоящей из вертикальной электрической антенны и пары взаимно ортогональных рамочных магнитных антенн и, следовательно, использованы в качестве исходных данных для решения задачи оценки координат (r, ψ, θ) точки размещения диполя. Если принять гипотезу о равномерном априорном распределении вероятностей для ориентации горизонтальной составляющей электрического диполя, то вероятности различных интервальных оценок угловых координат составят:

$$P \{|\varphi - \psi| \leq \Delta\} = \frac{\operatorname{arctg} ((\operatorname{tg} \Delta) / s)}{\operatorname{arctg} ((\operatorname{tg} \arccos u) / s)},$$

$$P \{\theta \leq \Theta\} = \frac{\operatorname{arctg} (\sqrt{\sin^2 \Theta - u^2} / (su))}{\operatorname{arctg} ((\operatorname{tg} \arccos u) / s)},$$

где $s = |(1 - uv)/(uv)|$, $0 \leq \Delta \leq \arccos u$, $\arcsin u \leq \Theta \leq \frac{\pi}{2}$.

Параметр φ легко определяется с помощью обычной техники метода наименьших квадратов. При известном параметре φ уравнения (2), (3) равносильны одному уравнению $h(t) = q'(t)/\alpha + q''(t)/\alpha^2$, где $h(t) = h_x(t) \cdot \sin \varphi - h_y(t) \cdot \cos \varphi$. Это позволяет свести рассматриваемую проблему к задаче идентификации параметров u , v и α системы дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \left(q(t) + q'(t) \frac{1}{\alpha} \right) \cdot (3u - 2v) + q''(t) \frac{u}{\alpha^2} = e(t), \\ q'(t) \frac{1}{\alpha} + q''(t) \frac{1}{\alpha^2} = h(t), \end{cases} \quad (4)$$

по заданным функциям $e(t)$ и $h(t)$, представляющим измеренные соответственно вертикальную составляющую электрического поля и горизонтальную составляющую магнитного поля.

Далее в главе в хронологическом порядке рассматриваются методы определения дальности до молниевых разрядов, использующие описанную модель

или её частные случаи. Более ранние методы используют более простые варианты данной модели. В ряде случаев диполь предполагается вертикальным, в других для описания пространственной ориентации диполя используется один параметр, применяемый для снятия систематической погрешности при определении дальности и позволяющий судить лишь о факте отклонения эквивалентного диполя от вертикали.

Основные трудности, возникающие при разработке методов пассивного местоопределения гроз, связаны с тем, что изменения параметров сигналов при распространении, используемые в целях дальнометрии, зачастую сравнимы с изменениями тех же параметров, определяемыми вариациями источников. Это требует разработки алгоритмов местоопределения, инвариантных к функции источника излучения.

Идея электромагнитного метода, использующего различную зависимость электрической и магнитной составляющих поля молниевых разряда от расстояния для определения дальности, высказана И.И. Кононовым [1]. Основное преимущество метода состоит в исключении явной зависимости оценки дальности от вариаций свойств источника разряда. Различие электрической и магнитной составляющих поля резко убывает с расстоянием и область дальностей, в которой применим электромагнитный метод, ограничивается ближней зоной (150 км).

Ярким примером широкополосного (импульсного) *EH*-дальномера является серийно выпускавшаяся отечественная однопунктовая система местоопределения молниевых разрядов ближней зоны “Очаг-2ГР” [4]. Данная система показала возможность повышения эффективности служб грозового оповещения за счет ее использования, несмотря на предположение о вертикальности эквивалентного диполя. Однако результаты численного исследования и многочисленные натурные эксперименты свидетельствуют о том, что отклонение ионизированного канала молнии от вертикали является основным источником погрешностей дальнометрии, препятствующих широкому распространению данной системы.

Фазовые методы дальнометрии относятся к узкополосным *EH*-методам и используют соотношения для фазы электрической и магнитной составляющих электромагнитного излучения. Эти методы подразделяются на моночастотные, в которых определение дальности производится по результатам измерения дополнительной фазы на одной частоте, и фазоспектральные, в которых исходными измеряемыми величинами являются значения фазы на двух и бо-

лее частотах или их линейные комбинации. Рассмотренные фазовые методы используют однопараметрическую характеристику пространственной ориентации дипольного источника. В работе приведены оценки влияния различных факторов на погрешность измерения фазовых параметров. Отмечена возможность неудовлетворительной оценки дальности фазовых методов дальнометрии.

Все последующие рассматриваемые в работе методы используют наиболее общую математическую модель проблемы, т.е. модель, характеризующую пространственную ориентацию диполя с помощью двух параметров [2,3,5].

Экстремальные методы дальнометрии относятся к импульсным *ЕН*-методам. Они допускают наличие невязок в уравнениях исходной системы, применяя принцип наименьших квадратов для нахождения искомого параметра.

Исключив функцию $q(t)$ из системы уравнений (4), получим

$$\int_0^t h(\tau) d\tau \cdot \alpha^2 w + h(t) \alpha w + h'(t) u = e(t) \alpha + e'(t), \quad (5)$$

где $w = 3u - 2v$.

Задача нахождения неизвестных параметров системы (4) сводится к экстремальной задаче

$$I(\mathbf{x}) = \int_0^\infty \left(x_1 k e' + x_2 e + x_3 k h' + x_4 h + x_5 \frac{1}{k_0} \int_0^t h(\tau) d\tau \right)^2 dt = (\mathbf{x}, \mathbf{A} \mathbf{x}) \rightarrow \min_{\mathbf{x}},$$

$$\text{где } \mathbf{A} = \int_0^\infty \mathbf{s} \cdot \mathbf{s}^T dt, \quad \mathbf{s} = \left(k \cdot e'(t) \quad e(t) \quad k \cdot h'(t) \quad h(t) \quad \frac{1}{k} \int_0^t h(\tau) d\tau \right)^T,$$

k – постоянная времени дифференцирующего и интегрирующего звеньев, введенная для согласования масштабов координат вектора \mathbf{x} . Из (5) следует, что $\lambda = 0$ является простым собственным значением матрицы квадратичной формы $I(x)$, и $\tilde{\mathbf{x}} = (1, k\alpha, -u, -k\alpha w, -k^2 \alpha^2 w)^T$ соответствующий собственный вектор. Следовательно, определить параметры u , v и α можно отыскав удовлетворяющее условию (5) решение однородной системы линейных алгебраических уравнений $\mathbf{A} \mathbf{x} = 0$. Таким образом определяются искомые параметры линейным экстремальным методом [3]. Однако проведенный вычислительный эксперимент показал высокую чувствительность таких алгоритмов к ошибкам вычисления элементов матрицы \mathbf{A} . Нелинейные параметрические методы улучшают обу-

словленность задачи за счет учета нелинейных связей между параметрами линейной задачи. Например, анализ нелинейного экстремального метода [5], в том числе методами имитационного моделирования, показал его высокую чувствительность к точности задания компонент поля диполя. Фактически, отмеченные выше результаты, в связи с приближенным характером формул, описывающих реальные компоненты поля источника электромагнитного излучения, показывают практическую неприменимость указанных параметрических методов к проблеме местоопределения отдельного источника электромагнитного излучения.

Прямой алгоритм [2], основанный на импульсном электромагнитном методе, сводится к определению параметров по формулам:

$$\begin{cases} \alpha = \sqrt{(\tilde{h}_1 \tilde{e}_2 - \tilde{h}_2 \tilde{e}_1) / (\tilde{h}_2 \tilde{e}_0 - \tilde{h}_1 \tilde{e}_1)}, \\ u = (\tilde{e}_0 \tilde{e}_2 - \tilde{e}_1^2) / (\tilde{h}_2 \tilde{e}_0 - \tilde{h}_1 \tilde{e}_1), \\ v = (3\tilde{h}_0 u \alpha - \tilde{e}_0 \alpha - g) / (2\tilde{h}_0 \alpha), \end{cases}$$

$$\text{где } \tilde{e}_k = \int_0^{+\infty} e^{(k)}(t) h^{(k)}(t) dt, \quad \tilde{h}_k = \int_0^{+\infty} (h^{(k)}(t))^2 dt, \quad \tilde{g} = \int_0^{+\infty} e'(t) h(t) dt, \quad k = 0, 1, 2.$$

Данный алгоритм был выведен в предположении, что в системе (4) имеют место точные равенства. В силу неидеальности моделей и наличия шумов в наблюдаемых сигналах, приходится допускать наличие невязок в уравнениях системы (4). Кроме того, для применения прямого метода необходимо использовать всю временную область, в которой сигнал от источника излучения отличен от нуля. Поэтому, с интуитивной точки зрения, искомые параметры предпочтительнее определять, используя принцип наименьших квадратов.

Для установления причин неудовлетворительной работы линейного и нелинейного экстремальных методов **во второй главе** проведен спектральный анализ матрицы **A**.

Пусть $\lambda_0 \leq \lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \lambda_3 \leq \lambda_4$ – собственные числа матрицы **A**, $\mathbf{x}^{(i)}$, $i=0,1,2,3,4$ – соответствующие собственные векторы. Анализ матрицы **A** показывает, что минимальное ненулевое собственное значение λ_1 близко к нулю. Поэтому задача определения собственного вектора, соответствующего минимальному собственному числу, является плохо обусловленной. С другой стороны, остальные собственные значения $\lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ хорошо разделены, поэтому вычисление соответствующих им собственных векторов представляет хорошо обусловленную задачу.

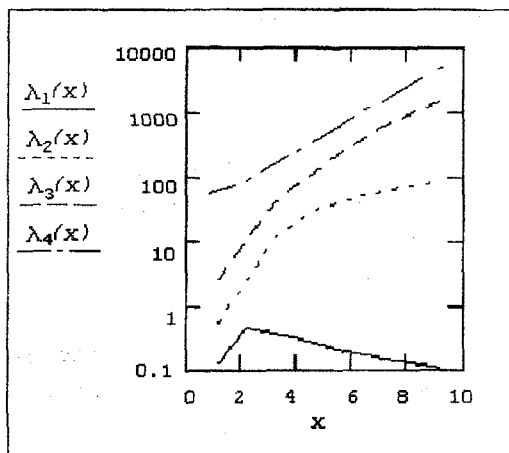


Рис. 2. Ненулевые собственные значения матрицы А

Параметры u , v и α могут быть найдены из условия ортогональности вектора \tilde{x} векторам $x^{(2)}$, $x^{(3)}$, $x^{(4)}$.

$$k\alpha = \begin{cases} \frac{2\Delta_{25}}{-\Delta_{24} - \Delta_{15} - \sqrt{(\Delta_{24} + \Delta_{15})^2 - 4\Delta_{14}\Delta_{25}}}, & \text{если } |\Delta_{25}| \geq |\Delta_{14}|, \\ \frac{-\Delta_{24} - \Delta_{15} - \sqrt{(\Delta_{24} + \Delta_{15})^2 - 4\Delta_{14}\Delta_{25}}}{2\Delta_{14}} & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

$$u = \frac{k\alpha\Delta_{13} + \Delta_{23}}{\Delta_{12}}, \quad w = \frac{-\Delta_{45}}{k\alpha\Delta_{24} + \Delta_{25}}, \quad v = \frac{3u - w}{2}.$$

где Δ_{mn} — определитель матрицы, полученной из матрицы $(x^{(2)}, x^{(3)}, x^{(4)})$ путем удаления строк с номерами m и n .

Полученные равенства дают экстремальный параметрический алгоритм вычисления параметров u , v и α устойчивый к ошибкам в исходных данных. Применение полученных формул требует предварительного решения полной симметрической проблемы собственных значений матрицы А. Известны вполне устойчивые алгоритмы решения указанной проблемы.

Для проведения вычислительного эксперимента и возможного использования в грозопеленгаторе-дальномере была разработана библиотека методов определения дальности до молниевых разряда. Библиотека содержит эффективную программную реализацию прямого и экстремального параметрического методов и несколько вариантов цифровой предобработки сигналов. Для чис-

ленного дифференцирования и интегрирования использованы обычные разностные и квадратурные формулы с точностью $o(\Delta t^2)$, где Δt – шаг дискретизации по времени. Для решения полной симметричной проблемы собственных значений, возникающей в экстремальном параметрическом методе, применяется метод вращений Гивенса.

С целью проведения вычислительного эксперимента была разработана система имитационного моделирования на ЭВМ молниевго разряда в ближней зоне. Система имитации на основе параметров эквивалентного дипольного источника электромагнитного излучения генерирует сигналы $e(t)$, $h_x(t)$, $h_y(t)$, представленные отсчетами мгновенных значений в дискретные моменты времени. В качестве дипольного момента использованы аппроксимации атмосфериков первого, второго и третьего типа по классификации Тейлора. Основными параметрами модели являются расстояние до молниевго разряда (от 10 до 150 км), пеленг и параметры пространственной ориентации эквивалентного диполя. Последние могут быть заданы непосредственно через угловые координаты диполя, с помощью двухпараметрической характеристики как в системе (4), а также с помощью однопараметрической как это осуществлялось в более ранних работах. Кроме того, параметрами, задаваемыми при моделировании, являются интервал дискретизации, амплитуда и длительность сигналов. Выходные сигналы, представленные целочисленными отсчетами, содержат шум квантования, который используется для оценки робастности исследуемых алгоритмов. Имеется возможность моделирования гауссова шума и добавление его в сигналы с действительными отсчетами мгновенных значений.

Для анализа точности и устойчивости экстремального параметрического алгоритма, а также сравнения его характеристик с прямым алгоритмом был проведен вычислительный эксперимент. С помощью системы имитационного моделирования были получены сигналы $e(t)$, $h_x(t)$, $h_y(t)$ с частотой дискретизации 500 кГц. Предметом анализа являлись зависимости среднего значения $\langle \delta \rangle$ относительной погрешности δ оценки расстояния r , а также среднеквадратического отклонения $\langle (\delta - \langle \delta \rangle)^2 \rangle$. Усреднение проводилось по трем типам атмосфериков и нескольким значениям параметров u , v . Из-за сложности аналитического описания погрешностей моделирования, для их имитации используется шум квантования при цифровом представлении принимаемых сигналов.

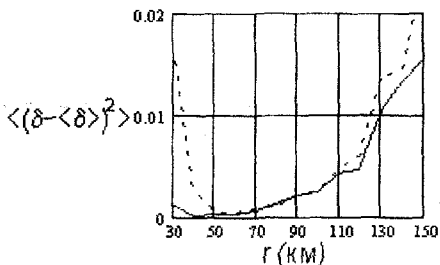


Рис. 3. Экспериментальные характеристики точности прямого и экстремального алгоритмов

Исследование влияния шума квантования на характеристики алгоритма проводилось посредством изменения амплитуды моделируемых сигналов. В частности, эксперимент показал возможность необнаружения источника излучения при амплитуде e_m сигнала $e(t)$ меньшей 2^7 , а также практическую безошибочность определения дальности при амплитуде $e_m \geq 2^9$. На рис. 3 представлены результаты эксперимента (пунктирная линия соответствует прямому методу, штриховая экстремальному параметрическому).

На основе проведенного вычислительного эксперимента было сделано заключение о более качественных характеристиках точности экстремального параметрического метода. Кроме того, экстремальный параметрический метод допускает вариацию времени наблюдения сигналов, что позволяет исследовать влияние ионосферы на адекватность математической модели задачи.

Проведенный вычислительный эксперимент позволяет определить требования к аппаратуре. Установлено, что достаточен шаг дискретизации по времени 5 мкс при числе уровней квантования 2^{12} . При этом 2^7 уровней необходимы для состоятельной оценки и 2^5 дополнительных уровней необходимы для вариации амплитуды сигналов.

Предлагается проект грозопеленгатора-дальномера, состоящего из антенной системы с блоком предобработки сигналов, локального канала связи и компьютера. Сигналы, принимаемые антенной системой, преобразуются в цифровую форму в блоке предобработки сигналов. Далее осуществляется цифровая фильтрация, буферизация и передача сигналов по каналу связи на компьютер.

Установлено, что блок предобработки, удовлетворяющий указанным требованиям, вполне может быть реализован из стандартных компонент.

Таким образом, проведенные теоретические и численные исследования показывают, что найденные математические модели и алгоритмы могут быть основой нового поколения однопунктовых систем местоопределения гроз в ближней зоне.

В **третьей главе** рассматривается программное обеспечение (ПО) автономного грозопеленгатора-дальномера (АГПД), разработанное в ходе работ по проекту МНТЦ 1822 “Разработка и исследование однопунктовой системы местоопределения гроз в диапазоне сверхдлинных волн”. В силу производственных обстоятельств в проекте МНТЦ 1822 структура аппаратной части АГПД отличается от рассмотренной в гл. 2. Отличия связаны с тем, что блок предобработки конструктивно совмещен с антенной системой (антенный блок). Блок предобработки реализован не на основе промышленного компьютера, а с использованием микропроцессорного набора, элементы которого размещены на нестандартной плате. Поэтому основное требование, предъявленное к разрабатываемому программному обеспечению АГПД, – гибкость к изменениям аппаратной части АГПД.

Создание ПО, как и решение любой проблемы, возможно несколькими способами. Поэтому в начале главы определяется процесс разработки ПО, устанавливающий методологическую основу решения указанной проблемы. Обычно выделяют две составляющие процесса разработки – организационную и директивную. Первая есть организованный набор шагов построения ПО, которые зачастую распределяются между несколькими разработчиками. Вторая составляющая определяет принципы разработки, среди которых наиболее важным является используемая парадигма, например, структурная, потоков данных или, как в нашем случае, объектно-ориентированная.

Далее в главе описываются результаты первоначального исследования данной проблемы, так называемое видение системы. Прежде всего, указываются основные требования проекта, ключевые функции и основные ограничения. Программная система (далее система) должна принимать сигналы из антенного блока, определять характеристики местоположения молниевых разряда, визуализировать результаты поиска местоположения молниевых разряда, предоставлять средства анализа грозовой активности, выполнять тестирование подсистем АГПД и самотестирование. Кроме того, система должна быть гибкой к числу каналов подключения к антенному блоку, а также допускать подключение нескольких диспетчерских мест к АГПД. Каналы независимы друг от друга и отличаются только коэффициентами усиления аналого-

вого сигнала принятого с антенны, что позволяет увеличивать динамический диапазон принимаемых сигналов.

В течение всего процесса разработки формируется словарь понятий проекта, используемый для определения терминов, относящихся как к предметной области, так и к области решения. В этой части главы указана его окончательная версия.

В результате первоначального исследования был также получен эскиз архитектуры, демонстрирующий разбиение программной системы на три подсистемы: программы управления, визуализации и ядро, и их физическое размещение на вычислительных узлах компьютерной сети. Программа визуализации используется для мониторинга грозовой активности. Ядро системы принимает сигналы из антенного блока, определяет местоположение молниевозрядов, сохраняет всю информацию в базе данных, уведомляет программу визуализации о получении нового разряда, выполняет тестирование и самотестирование. Программа управления предоставляет графический интерфейс для запуска/останова ядра системы, управления настройками, проведения вычислительного эксперимента с использованием имитатора, являющегося частью антенного блока. Система является распределенной, т.к. данные подсистемы могут работать как на одном компьютере, так и на различных.

Для выявления функциональных требований применялись прецеденты или, иначе, типичные сценарии использования системы, которые, реализовавшись, дают существенный результат для некоторых внешних сущностей (исполнителей) – людей, программ или аппаратуры, взаимодействующих с разрабатываемой программной системой. Пользователь взаимодействует с системой для мониторинга грозовой активности. Администратор запускает/останавливает ядро системы, указывая режим работы, производит диагностику и контроль системы, управляет ее настройками. Антенный блок тоже является внешней сущностью, взаимодействующей с системой. Данные исполнители инициируют одни прецеденты и могут участвовать в других. Прецеденты служат целям функциональной декомпозиции разрабатываемой системы и не содержат сведений о способе программной реализации. Первым шагом к объектной декомпозиции системы является модель понятий предметной области, являющаяся основным артефактом объектно-ориентированного анализа. К нефункциональным требованиям проекта можно отнести целевую платформу (Windows 2000/XP), интерфейс и протокол взаимодействия с антенным блоком (RS-422).

Проведенный анализ требований показал, что система может быть реализована в рамках уже выделенных подсистем, которые могут разрабатываться независимо друг от друга. Реализация программы визуализации связана с вторичной обработкой сведений о местоположении молниевых разрядов, в первую очередь с кластеризацией молниевых разрядов в грозовой очаг. Решение этих проблем не входит в цели работы, поэтому описание реализации программы визуализации в работе не приводится, а описывается только системное ПО АГПД.

Далее в главе приведена модель проектирования, демонстрирующая реализацию каждого выявленного сценария (прецедента) использования системы в терминах взаимодействующих объектов. Встретившиеся проблемы, как и пути их решения, также поясняются в данном разделе главы. Например, прием сигналов необходимо осуществлять в реальном времени, поэтому было принято решение, что ядро должно выполнять прием сигналов из канала связи, запись данных в канал и обработку полученных данных в различных потоках. На архитектуру системы также существенно повлияло требование подключения к антенному блоку по нескольким каналам связи. Каналы передают сигналы от одного источника молнии с различным усилением. Это влечет необходимость синхронизации и совместной обработки полученных сигналов.

Глава завершается описанием стендовых испытаний ПО АГПД по сигналам от имитатора, содержащегося в антенном блоке. Результаты стендовых испытаний в целом совпадают с результатами вычислительного эксперимента.

Автором было разработано системное ПО, которое вместе с зарегистрированной библиотекой методов определения дальности до молниевых разрядов было внедрено, прошло стендовые испытания в пилотном образце АГПД, разрабатываемом по проекту МНПЦ 1822.

Приложения содержат копии свидетельств о регистрации программ, протоколы приемо-сдаточных испытаний разработанного программного обеспечения по методике, предложенной ЗАО "НИИИТ-РК", акты об использовании ПО в пилотном образце грозопеленгатора-дальномера, описание реализации библиотеки методов, результаты стендовых испытаний.

В Заключение подведены итоги проведенного исследования.

Основные результаты работы

1. Разработан новый робастный метод определения дальности до молниевых разрядов в ближней зоне (до 100 км), реализующий принцип наименьших квадратов для минимизации невязки в уравнениях исходной математической модели задачи. Последнее обстоятельство и результаты численного исследования позволяют утверждать, что данный метод может быть основой грозопеленгатора-дальномера нового поколения, структура аппаратной части которого также предложена в работе.

2. Реализована и зарегистрирована в РосАПО библиотека методов однопунктового определения дальности до молниевых разрядов, содержащая, в том числе, эффективную реализацию разработанного экстремального параметрического метода, алгоритмы предобработки регистрируемых сигналов, систему имитационного моделирования молниевых разрядов в ближней зоне.

3. Реализована программная часть грозопеленгатора-дальномера, имеющего предложенную структуру аппаратной части. Данное программное обеспечение вместе с реализованной библиотекой методов используется в грозопеленгаторе-дальномере, разработанном по проекту МНТЦ 1822.

4. Предложен способ исследования влияния ионосферы на адекватность математической модели задачи по данным натурального эксперимента.

Публикации автора по теме диссертации

1. Панюков А.В., Будуев Д.В. Экстремальный метод дальнометрии гроз // Информационный бюллетень Ассоциации математического программирования. – Екатеринбург: УрО РАН, 1999. – Вып. 8. – С. 218–219.

2. Панюков А. В., Будуев Д. В. Алгоритм определения расстояния до местоположения молниевых разрядов // Электричество. – 2001. – № 4. – С. 10–14.

3. Будуев Д.В., Панюков А.В. Программное обеспечение полевых испытаний автономного грозопеленгатора // Обозрение прикладной и промышленной математики. – 2001. – Том 8. – Вып. 2. – С. 545.

4. Panyukov A.V., Buduev D.V. Single-point lightning location system // International Conference on Lightning Protection. Krakow, Poland, 2nd-6th September 2002. Conference Proceedings. Vol. 1. – APPE. – P. 127–130.

5. Будуев Д.В., Малов Д.Н. Аналитическое и численное исследование алгоритма для однопунктовой системы определения местоположения гроз // Труды 2-го международного конгресса “Молодежь и Наука – третье тысячелетие”. Москва, МГТУ им. Баумана, 15–19 апреля 2002. – Том 1. – С. 10–12.

6. Панюков А.В., Будуев Д.В. Библиотека методов определения местоположения дипольного источника излучения. Свид. № 2002610234 // Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам: Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем. – 2002. – №1(39). – С.149–150.

7. Будуев Д.В., Панюков А.В. Однопунктовая система определения местоположения грозových очагов // Компьютерное и математическое моделирование в естественных и технических науках: Материалы IV Всероссийской научной конференции (апрель–май 2002 г.) / Гл. ред. серии А. А. Арзамасцев. – Тамбов: ИМФИ ТГУ им. Г. Р. Державина, 2002. – Вып. 19. – С. 28–34.

8. Будуев Д.В. Программное обеспечение автономного СДВ грозопеленгатора-дальномера // Пятая Российская конференция по атмосферному электричеству. Владимир, 21–26 сентября 2003. – С. 346–348.

Будуев

Список литературы

1. Кононов И. И., Петренко И. А., Снегуров В. С. Радиотехнические методы местоопределения грозových очагов. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 222 с.
2. Panyukov A. V. Estimation of the location of an arbitrarily oriented dipole under single-point direction finding // Journal of geophysical research. Vol. 101. No D10. P. 14,977–14,982. June 27, 1996. (USA)
3. Панюков А. В., Крохин Н. И., Семагин Б. В., Файзулин Н. А., Однопунктовая система местоопределения гроз в ближней зоне. Авторское свидетельство СССР № 720384, СССР. – Бюллетень изобретений. – 1980. – №9.
4. Грозопеленгатор-дальномер “ОЧАГ-2П”. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 30 с.
5. Панюков А. В., Файзулин Н. А. Нелинейный экстремальный алгоритм местоопределения грозových очагов // IV всесоюзный симпозиум по атмосферному электричеству (Нальчик, 7–11 октября 1990 г.). Тезисы докладов. – Нальчик: Высокоточный геофизический институт АН СССР. – С. 139–140.

Будуев Денис Владимирович

ОДНОПУНКТОВАЯ СИСТЕМА ПАССИВНОГО МОНИТОРИНГА
ГРОЗОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

(модели, методы, программное обеспечение)

Специальность 05.13.18 – «Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Издательство Южно-Уральского государственного университета

ИД № 00200 от 28.09.99. Подписано в печать 13.05.2004. Формат 60*84 1/16 Печать трафаретная. Усл. печ.л. 1,16. Уч.-изд. л. 1,12 Тираж 110 экз. Заказ 137/31.

Группа МЭНИ Издательства 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.