

05 5.18
М 37

Контрольный
экземпляр
На правах рукописи

Малов Дмитрий Николаевич

**МНОГОПУНКТОВЫЕ СИСТЕМЫ 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
2005

Работа выполнена в Южно-Уральском государственном университете.

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

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Соколинский Л.Б.;

доктор технических наук,
профессор Родионов В.В.

Ведущая организация – Федеральное государственное унитарное
предприятие Российский федеральный
ядерный центр – Всероссийский научно-
исследовательский институт технической
физики имени академика Е.И. Забабахина.

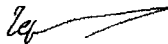
Защита диссертации состоится 16 марта 2005 г., в 14 часов, на заседании диссертационного совета Д212.298.02 в Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

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

Автореферат разослан 8 февраля 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



А.О.Чернявский

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Вопросы определения местоположения молниевых разрядов радиотехническими методами представляют интерес как для фундаментальной науки, так и для практики. Поражения грозowymi разрядами ежегодно наносят значительный ущерб электрическим и информационным сетям, зданиям и сооружениям, лесному хозяйству, а своевременное обнаружение молниевой активности и слежение за ее развитием в пространстве и времени позволяет во многих случаях избежать ущерба или существенно снизить его. Оперативное определение местоположения грозowych очагов особенно важно для метеорологического обеспечения авиации и космонавтики. С точки зрения фундаментальной науки, оперативная и достоверная информация о грозowych явлениях позволит решать проблемы гидрологии, метеорологии, физики атмосферы.

Для организации наблюдений за грозовой обстановкой широко применяются метеорадиолокаторы, а в последнее время – искусственные спутники Земли. Однако результаты их наблюдений, позволяющие с определенной вероятностью предположить молниевую активность, оказываются недостаточными, когда требуется информация о координатах молний в реальном масштабе времени. Указанная информация может быть получена с помощью пассивных однопунктовых и многопунктовых радиотехнических систем местопредопределения молний, основанных на использовании особенностей изменения пространственно-временных характеристик электрической и магнитной компонент поля источника электромагнитного излучения.

Ведущими странами в области многопунктовых систем местопредопределения молниевых разрядов являются США (системы NLDN и LDAR), страны Западной Европы (SAFIR), практически полностью покрывшие свои территории такими системами. Все эти системы основаны на пеленгационном методе, либо разностно-дальномерном, либо их комбинации, и предполагают наличие 3-х и более пунктов наблюдения.

При использовании многопунктового разностно-дальномерного метода, в каждом пункте наблюдения измеряется время регистрации сигнала от молниевых разрядов. Разность между временами прихода сигнала на два пункта определяет гиперболу, а пересечение нескольких гипербол указывает на источник излучения. В пеленгационном способе местоположение молниевых разрядов определяется как пересечение азимутов источника электромагнитного излучения из каждого пункта наблюдения.

К недостаткам таких систем можно отнести: возможность работы системы только в пределах прямой видимости, из-за использования диапазона ультракоротких волн (УКВ), необходимость высокоточной синхронизации системных часов на пунктах регистрации, уменьшение точности при увеличении базовых размеров системы и наличие зон с возрастающей ошибкой местопредопределения. В случае использования для определения азимутов рамочных сверх-

длинноволновых (СДВ) пеленгаторов снимается условие прямой видимости разряда, но сильно возрастают методические погрешности определения пеленга и возникают сложности при идентификации принадлежности принятых в разных пунктах сигналов одному и тому же разряду.

Исторически в России разрабатывались в основном однопунктовые грозопеленгаторы-дальномеры. Такими разработками занимались в ГГО им. А.И. Воейкова, СПбГУ (г. Санкт-Петербург), в институте радиотехники РАН (г. Москва), ЗАО НИИИТ-РК, ЮУрГУ (г. Челябинск), в институте космифизических исследований и аэронамии республики Саха (г. Якутск). К основным достоинствам однопунктовых систем можно отнести: их относительную простоту, невысокую стоимость внедрения и эксплуатации, автономность и мобильность, необязательность наличия развитой инфраструктуры связи. В настоящее время, в соответствии с проектом МНТЦ №1822, ведется разработка сверхдлинноволнового автономного грозопеленгатора-дальномера (АГПД) нового поколения, определяющего расстояние до молниевых разрядов и ряд других его параметров. Используемый в нем рамочный пеленгатор определяет величину, называемую *псевдопеленгом*, значение которой совпадает с истинным пеленгом только в случае вертикального молниевых разряда, так как при использовании однопунктовых систем местоопределения, имеется неустранимая неопределенность в оценке местоположения источника излучения.

В последнее время бурное развитие вычислительной техники и систем связи дало возможность объединить однопунктовые грозопеленгаторы-дальномеры в единую систему и организовать совместную обработку сигналов отдельных грозопеленгаторов-дальномеров. Кроме того, автоматизация сбора информации с пунктов наблюдения поможет различным службам более оперативно реагировать на изменение грозовой обстановки.

Многopунктовый пеленгационно-дальномерный метод, предложенный Паниюковым А.В., в отличие от классического пеленгационного, использует для расчетов значение псевдопеленга на источник излучения и позволяет исключить неопределенность в оценке координат молниевых разрядов, что делает актуальной задачу повышения точности оценки самого псевдопеленга на каждом пункте наблюдения.

Заметим, что использование пеленгационно-дальномерного метода предполагает знание соотношения действующих высот магнитных и электрической антенн. Определение которого является сложной технической проблемой, требующей наличия эталонного измерителя или обработки большого объема статистических данных. Поэтому представляет интерес разработка других методов определения местоположения молниевых разрядов, не требующих знания этого соотношения.

Целью диссертации является разработка и исследование методов интеграции автономных грозопеленгаторов-дальномеров в единую систему, создание программно-аппаратного комплекса местоопределения грозовых очагов

по результатам пассивного мониторинга электромагнитного поля в диапазоне СДВ. В связи с поставленной целью решаются следующие задачи:

- 1) разработка и исследование оптимальных методов определения псевдопеленга на источник излучения;
- 2) исследование и разработка методов многопунктового местоопределения источника излучения с помощью сети автономных грозопеленгаторов-дальномеров;
- 3) разработка архитектуры многопунктовой системы местоопределения молниевых разрядов и создание ее программного обеспечения.

Научная новизна теоретических и экспериментальных результатов полученных в данной диссертации заключается в следующем.

1. В рамках используемой математической модели молниевых разряда (дипольный источник электромагнитного излучения над бесконечно проводящей землей) разработан метод оценки псевдопеленга на молниевый разряд по наблюдаемым СДВ сигналам. Показана практическая несмещенность данной оценки и найдена зависимость дисперсии оценки от значения псевдопеленга и отношения сигнал/шум. Предложен метод снижения дисперсии оценки псевдопеленга за счет увеличения числа каналов пеленгатора.
2. Предложен метод статистического определения отношения действующих высот антенн АГПД, модифицирован многопунктовый пеленгационно-дальномерный метод и предложена методика оценки точностных характеристик автономного грозопеленгатора-дальномера.
3. Предложен дальномерный метод определения местоположения молниевых разрядов, не чувствительный к наличию аномальной составляющей магнитного поля, который в отличие от известных методов, не требует высокоточной синхронизации системных часов на пунктах наблюдения и знания соотношения действующих высот антенн. Проведено аналитическое исследование данного метода и даны рекомендации по оптимизации его точности.
4. На основе предложенных методов разработана архитектура многопунктовой системы местоопределения молниевых разрядов и ее программное обеспечение.

Практическая значимость. Информация о молниевой активности, предоставляемая разработанной системой, позволит решать некоторые проблемы геологии, гидрологии, метеорологии, экологии. Примерами практического использования данной информации, в частности, являются: обеспечение безопасности авиационных и морских перевозок; быстрое обнаружение и устранение вызванных грозой аварий в крупномасштабных распределенных системах.

Разработанный метод определения оценки псевдопеленга и программное обеспечение многопунктовой системы местоопределения молниевых разрядов (свид. РосАПО об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002610234) внедрены в пилотный образец автономного грозопеленгатора-дальномера разработанный в ЗАО НИИИТ-РК (Челябинск) и ФГУП РФЯЦ-

ВНИИТФ им.акад. Е.И. Забабахина (г. Снежинск), в соответствии с проектом МНТЦ №1822.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских научных мероприятиях:

- Международная конференция «International Conference on Lightning Detection – 2004», Хельсинки, сентябрь 2004 г.
- 5-ая национальная конференция по атмосферному электричеству, Владимир, сентябрь 2003 г.
- Международная конференция «International Conference on Lightning Protection – 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.
- Третий всероссийский симпозиум по прикладной и промышленной математике, Ростов, апрель 2002 г.
- Международная конференция «Computer Science and Information Technologies», Уфа, сентябрь 2001 г.
- Международная конференция «Методы оптимизации и их приложения», Иркутск, июнь 2001 г.
- Конференция Ассоциации математического программирования, Екатеринбург, февраль 2001 г.
- Всероссийский симпозиум по прикладной и промышленной математике, Йошкар-Ола, декабрь 2001 г.
- Ежегодных научно-технических конференциях ЮУрГУ.

Основание для выполнения работы. Тематика диссертационной работы была поддержана конкурсным центром по грантам в области энергетики и электротехники Минобразования РФ (грант 45Гр-98), грантами РФФИ (проекты 01-07-90161, 02-07-060090-мас, 03-07-06052-мас – «Сетевое инструментальное программное обеспечение для многопунктовой системы пассивного мониторинга грозовой деятельности») и МНТЦ (проект 1822 – «Разработка однопунктового грозопеленгатора-дальномера»).

Работа награждена дипломами Комитета общественных и межрегиональных связей Правительства Москвы, Министерства промышленности, науки и технологий Российской Федерации, дипломами лауреата Второго Международного Конгресса молодых ученых, выставки «Политехника», компьютерной выставки «Молодежь и информационные технологии», победила в профессиональной номинации «Лучшая работа по радиоэлектронике и лазерной технике».

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 13 печатных работах, получено свидетельство РосАПО об официальной регистра-

ции программы для ЭВМ № 2002610234 «Комплекс программ для сети автономных грозопеленгаторов-дальномеров».

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений; изложена на 235 страницах машинописного текста, содержит 50 рисунков и 7 таблиц, библиография содержит 129 наименований. В приложение включены вспомогательные материалы, фрагменты исходных текстов и акты внедрения результатов работы.

Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель работы, кратко охарактеризована научная новизна, возможности научного и практического применения, отмечена связь проблемы с планами научных исследований. Кроме того, приведено краткое изложение материала работы по главам и параграфам.

В **Первой главе** выполнен обзор литературы, посвященной исследованиям и разработке методов пассивного определения местоположения молниевых разрядов, а также рассмотрены существующие типы эксплуатируемых систем определения местоположения гроз.

Отмечено, что в настоящее время накоплен достаточно большой объем материала, посвященного проблеме определения координат местоположения молниевых разрядов. Этой теме посвящены работы Александра М. С., Базеляна Э.М., Бару Н.В., Гальперина М.С., Кононова И.И., Кашпровского В.Е., Панюкова А.В., Петренко И.А., Ракова В.А., Снегурова В.С., Файзулина Н.А., Richard P., Krider E.P., Noggle R.C., Uman M.A., Lin Y.T., Murphy M., Zaharescu R., Holle R., Cummins K. и других авторов. В ряде литературных источников отмечено, что разработанные однопунктовые системы определения координат грозовых разрядов не обладают высокой точностью определения координат и достаточной вероятностью обнаружения разрядов. Так же указано, что существующие многопунктовые системы достаточно дороги во внедрении и эксплуатации, а также обладают небольшим радиусом действия сенсоров.

Обзор существующих систем пассивного местоопределения гроз показал, что, наибольшее распространение получили многопунктовые пеленгационные и разноотно-дальномерные методы, а также их комбинации.

В диссертационной работе отмечено, что к основным недостаткам, применяемого в широко распространенной системе NLDN (США), разноотно-дальномерного УКВ метода, следует отнести работу сенсоров только в пределах прямой видимости (вследствие использования диапазона УКВ), фиксацию только разрядов облако-земля, и необходимость высокоточной синхронизации системных часов на пунктах регистрации.

Используемый в системе SAFIR (Франция) пеленгационный способ позволяет определять место источников УКВ излучения в трех измерениях. Однако

эта система также работоспособна только в пределах прямой видимости; кроме того, в ней наблюдается наличие зон с возрастающей ошибкой местоопределения. В системе IMPACT (США) использована комбинация указанных выше способов, что позволяет повысить вероятность и точность местоопределения.

В нашей стране испытывался недостаток в повсеместно развитых и доступных системах связи, поэтому применение многопунктовых систем было затруднено и наибольшее внимание уделялось развитию однопунктовых методов. Однопунктовое местоопределение основано на представлении молниевового разряда в качестве произвольно ориентированного электрического диполя, размещенного над бесконечно проводящей поверхностью. Такая модель вполне адекватно описывает молниевый разряд и подстилающую поверхность на расстоянии до 100 км при использовании для измерений диапазона СДВ.

Ортогональные проекции компонент поля, индуцируемого в точке O электрическим диполем, e_z , h_x и h_y 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 точки размещения диполя.

При разработке отечественного промышленного образца автономного грозопеленгатора-дальномера, «Очаг-2П» была принята гипотеза о вертикальности эквивалентного диполя. Опытная эксплуатация показала возможность применения такого рода однопунктовых систем, однако из-за невысоких точностных и вероятностных характеристик данных АГПД широкого применения не получил. Рамочная магнитная антенна, применяемая в АГПД для измерения магнитной составляющей поля диполя, реагирует как на продольную нормальную, так и на поперечную аномальную составляющие магнитной компоненты электромагнитного поля. Эта аномальная составляющая, возникающая из-за начального отклонения эквивалентного диполя от вертикали или неравномерного перемещения фронта радиоволны, порождает так называемые поляризационные ошибки определения пеленга. Фактически в подобных однопунктовых системах определяется не значение пеленга на источник излучения ψ , а приближенная к ней величина φ , называемая псевдопеленгом. Оценка псевдопеленга φ , в отличие от пеленга ψ , может быть получена с помощью известной техники пеленгования.

Более адекватная модель, учитывающая возможную неvertикальность эквивалентного диполя, была использована при создании пилотного образца автономного грозопеленгатора-дальномера нового поколения, разработанного в соответствии с проектом МНТЦ №1822. Используемый метод позволяет определить обобщенные параметры молниевового разряда, по которым строятся интервальные оценки размещения диполя.

Неопределенность в определении местоположения молниевового разряда оказывается принципиально неизбежной при использовании однопунктовых

систем, однако эти ошибки можно устранить, определяя его обобщенные параметры в двух или более точках. Таким образом, за счет интеграции одно-пунктовых систем пассивного мониторинга грозовой деятельности в единую вычислительную сеть можно повысить вероятность обнаружения молниевых разрядов и точность определения его координат. Кроме того, повышение степени автоматизации сбора информации с постов наблюдения дает возможность оперативно получать данные и принимать адекватные решения в соответствии с текущей грозовой обстановкой.

На основании выполненного обзора литературных источников и существующих систем, в диссертации были сформулированы цель диссертационной работы и задачи исследования.

Во **Второй главе** рассматривается многопунктовый пеленгационно-дальномерный метод, исследовано использование метода наименьших квадратов для определения координат в этом методе, найдены аналитические зависимости погрешности определения местоположения источника излучения от результатов измерений и их погрешностей. Для математической модели молниевых разрядов, в виде произвольно ориентированного диполя, предложен способ определения оптимальной оценки псевдопеленга с помощью метода наименьших квадратов и доказывается ее несмещенность, находится зависимость дисперсии от значения псевдопеленга и отношения сигнал/шум и предлагается метод снижения дисперсии. Также предлагаются метод статистического определения отношения коэффициентов усиления в каналах рамочных магнитных и штыревой электрической антенн, и метод оценки точностных характеристик АГПД.

Пеленгационно-дальномерный метод, предложенный Панюковым А.В. в 1996 г., использует для расчетов измеренные автономными грозопеленгаторами-дальномерами значения обобщенных параметров молниевых разрядов, а не значения пеленгов ψ , как классический пеленгационный метод. Это делает его нечувствительным к наличию аномальной составляющей в наблюдаемом магнитном поле. В пеленгационно-дальномерном методе отсутствует требование высокоточной синхронизации, характерное для разностно-дальномерного метода, а возможность оценки местоположения молниевых разрядов на каждом пункте устраняет коллизии в идентификации соответствия зарегистрированных сигналов конкретным молниевым разрядам. Наконец, данный метод дает возможность определения трех координат местоположения эквивалентного дипольного источника.

Пусть (x, y) – декартовы координаты молниевых разрядов; (x_i, y_i) – декартовы координаты i -ого пункта наблюдения, $i=1,2,\dots,n$; (r_i, φ_i, u_i) – параметры молниевых разрядов, измеренные в нем. Тогда имеет место система уравнений

$$(x_i - x) \cos \varphi_i + (y_i - y) \sin \varphi_i = r_i u_i, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Если наблюдаемый диполь не является горизонтальным, то данная система уравнений имеет полный ранг и может быть решена методом наименьших квадратов

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\Delta} \sum_{i=1}^n \left(a_i \sum_{k=1}^n \sin \varphi_k \sin(\varphi_k - \varphi_i) \right) \\ \frac{1}{\Delta} \sum_{i=1}^n \left(a_i \sum_{k=1}^n \cos \varphi_k \sin(\varphi_i - \varphi_k) \right) \end{pmatrix},$$

где $a_i = x_i \cos \varphi_i + y_i \sin \varphi_i - r_i u_i$, $\Delta = \sum_{1 \leq k < i \leq n} \sin^2(\varphi_k - \varphi_i)$.

Для горизонтального диполя $\varphi_k = \varphi_0$, $k=1, 2, \dots, n$, поэтому при приближении диполя к горизонтальному положению резко падает точность определения его координат. Проведенный в работе вычислительный эксперимент показал, что при отклонении диполя от горизонтали более чем 10^{-5} радиана, неопределенность оценки координат разряда, обусловленная отклонением эквивалентного диполя от вертикали, практически исключается.

Погрешности определения измеряемых параметров r и u были ранее исследованы в работах Панюкова А.В. Использование пеленгационно-дальномерного метода исключает ошибки, вызванные использованием оценки псевдопеленга вместо значения пеленга, что заставляет обратить внимание на разработку более точных методов определения псевдопеленга и оценку их погрешностей. В работе показано, что по наблюдаемым в антенной системе сигналам $e_z(t)$, $h_x(t)$ и $h_y(t)$, $t \in [0, T]$ оценка псевдопеленга φ^* , полученная по методу наименьших квадратов, может быть определена из соотношений:

$$\cos(2\varphi) = \frac{(\|h_x\|^2 - \|h_y\|^2)}{\sqrt{(\|h_x\|^2 - \|h_y\|^2)^2 + 4(h_x, h_y)^2}}, \quad \sin(2\varphi) = \frac{2(h_x, h_y)}{\sqrt{(\|h_x\|^2 - \|h_y\|^2)^2 + 4(h_x, h_y)^2}},$$

$$\varphi^* = \arg \max_{\varphi \in \{\varphi, \varphi + \pi\}} (h_x \sin \varphi - h_y \cos \varphi, e),$$

где $(h_x, h_y) = \int_0^T h_x(t) h_y(t) dt$, $\|h_x\| = \sqrt{(h_x, h_x)}$, $\|h_y\| = \sqrt{(h_y, h_y)}$.

Аналитическое исследование устойчивости данного метода определения псевдопеленга к наличию аддитивного шума в каналах рамочных антенн показало, что рассмотренный метод дает практически несмещенную оценку, а при малых значениях отношения мощности шума к мощности сигнала (σ^2/S^2), имеет место оценка дисперсии

$$D\{\varphi\} \approx \frac{\sigma^2}{S^2} (1 - 2|\sin 2\varphi| \cdot \cos^2 2\varphi).$$

Таким образом, предложенный алгоритм является вполне устойчивым к погрешностям моделирования. График дисперсии оценки псевдопеленга $D(\varphi)$ приведен на рис. 1а. Легко заметить, что использование трех дополнительных пар рамочных антенн, даст зависимость, приведенную рис. 1б.

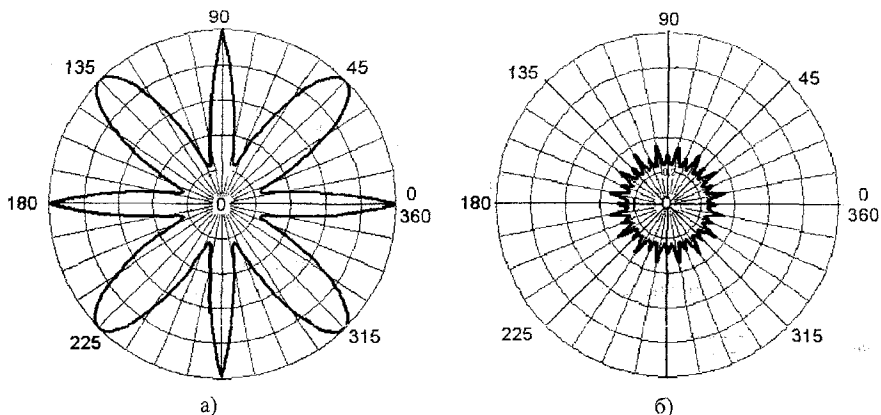


Рис. 1. Графики дисперсии оценки псевдопеленга $D(\varphi)$:
 а) одна пара антенн; б) четыре пары антенн

Пеленгационно-дальномерный метод основан на определении местоположения молниевых разряда как точки пересечения множеств возможного положения, относящиеся к одному молниевому разряду и полученных с нескольких станций наблюдения (рис. 2а). Однако, вследствие аппаратных и методических погрешностей, возможно, что пересечение множеств окажется пустым (рис. 2б). В этом случае, предлагается в качестве оценки положения разряда брать середину отрезка соединяющего ближайшие точки данных множеств, что позволяет улучшить точность местоопределения молниевых разряда.

Результаты численного исследования точности пеленгационно-дальномерного метода для двух и трех пунктов наблюдения представлены на рис. 3. При построении графиков абсолютной погрешности предполагалось, что пункты наблюдения, обозначенные на рисунках как S1, S2 и S3, расположены на расстоянии 50 км от центра координат, относительная погрешность измерений параметров принята равной 0,01.

Предложенный выше модифицированный пеленгационно-дальномерный метод использовался для определения точностных характеристик автономных грозопеленгаторов-дальномеров в проекте МНТЦ №1822 и показал, что относительная погрешность измерения расстояния до молниевых разряда с помощью АГПД равна 0,127. Примеры результатов работы АГПД и пеленгационно-дальномерного метода приведены на рис. 4.

Применение пеленгационно-дальномерного метода требует вычисления на всех станциях параметра u для каждого разряда. Для этого параметра нахождения необходимо знание отношения действующих высот рамочных магнитных и штыревой электрической антенн. Данное отношения может быть найдено либо с помощью эталонного измерителя, либо на основе статистических данных.

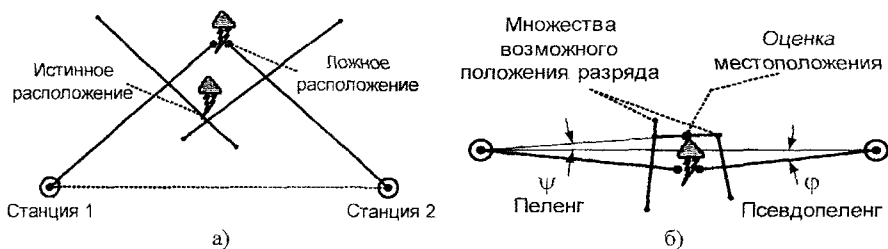


Рис. 2. Пеленгационно-дальномерный метод:
 а) непустое пересечение множеств; б) пустое пересечение множеств

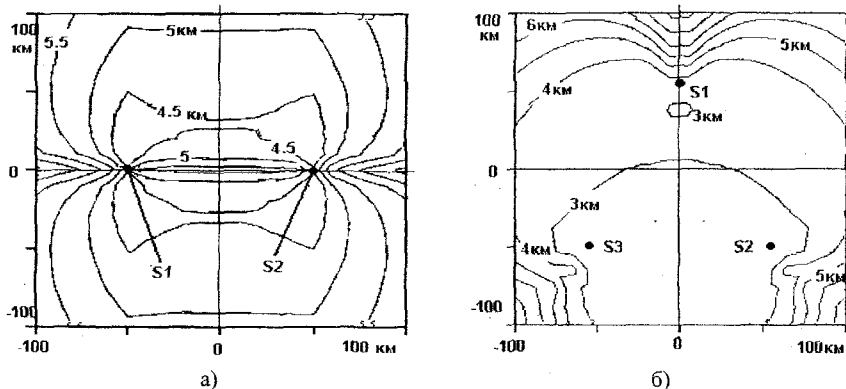


Рис. 3. Абсолютная погрешность определения координат разряда пеленгационно-дальномерного метода: а) два пункта; б) три пункта

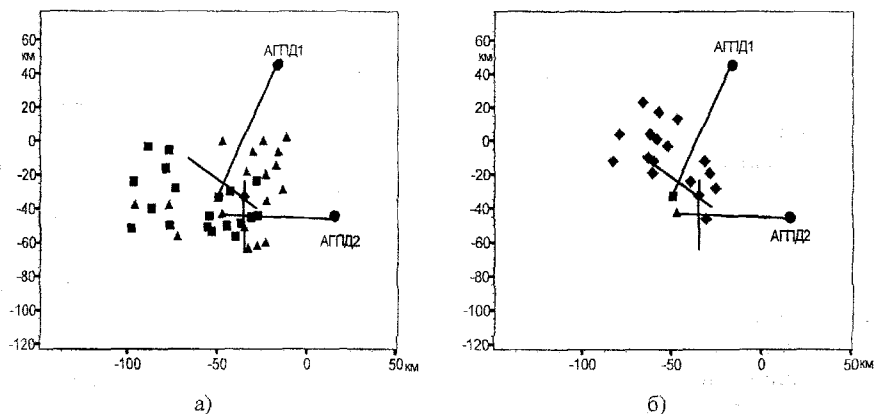


Рис. 4. Грозовая активность за 18.06.2004 14:00–14:15:
 а) однопунктовое местоопределение; б) многопунктовое местоопределение;
 ▲ – показания АГПД1; ■ – показания АГПД2; ◆ – результаты совместной обработки

Поскольку для дальних атмосфериков имеет место соотношение $k \approx \|e(t)\| / \|h_y(t) \cos \varphi - h_x(t) \sin \varphi\|$, где k – искомое отношение действующих высот, то эти сигналы могут быть использованы для статистической оценки k . В работе предложен метод селекции таких разрядов по значению квазиметрики

$$\Delta(e, h_x, h_y) = \left\| \frac{e(t)}{\|e(t)\|} - \frac{h(t)}{\|h(t)\|} \right\|, \text{ где } h(t) = \arg \max_{\{h_x(t), h_y(t)\}} \{\|h_x(t)\|, \|h_y(t)\|\}.$$

Данный метод оценки отношения действующих высот был внедрен в пилотный образец АГПД (проект МНГЦ №1822).

Так как процесс определения отношения действующих высот требует обработки большого объема данных, то представляет интерес разработка других методов решения исследуемой задачи, не требующих знания данного отношения. Отметим, что методы вычисления параметров r_i и φ_i , $i=1, 2, \dots, n$ не требуют знания этой величины.

В Третьей главе предложен дальномерный метод местоопределения молниевых разрядов, найдены аналитические зависимости относительной погрешности определения координат источника излучения от результатов измерений и их погрешностей. Исследовано влияние эффекта масштабирования на число обусловленности системы.

Предложенный дальномерный метод определения координат источника излучения, в отличие от пеленгационно-дальномерного, не требует предварительного знания соотношения действующих высот антенн. Сущность метода состоит в том, что декартовы координаты (x_i, y_i) i -го пункта наблюдения $i=1, 2, \dots, n$, $n \geq 3$, молниевое разряда (x, y, z) и дальности r_i от пунктов наблюдения до источника удовлетворяют системе уравнений

$$r_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + z^2, \quad i=1, 2, \dots, n,$$

которая преобразуется в систему линейных уравнений

$$cm - 2x_i x - 2y_i y = r_i^2 - x_i^2 - y_i^2, \quad m = (x^2 + y^2 + z^2)/c,$$

где c – коэффициент масштабирования, введенный для изучения числа обусловленности системы. Если пункты наблюдения не лежат на одной прямой, то полученная система будет иметь полный ранг, и ее наилучшее, в смысле метода наименьших квадратов, решение определяется формулой

$$\begin{pmatrix} m \\ x \\ y \end{pmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T B, \quad \text{где } A = \begin{pmatrix} c & -2x_1 & -2y_1 \\ c & -2x_2 & -2y_2 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ c & -2x_n & -2y_n \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} r_1^2 - (x_1^2 + y_1^2) \\ r_2^2 - (x_2^2 + y_2^2) \\ \cdot \\ r_n^2 - (x_n^2 + y_n^2) \end{pmatrix}.$$

При фиксированном множестве пунктов наблюдения матрица A постоянна, следовательно, еще на этапе проектирования системы легко построить опти-

мальный по точности алгоритм вычисления неизвестных, т.к. произведение $(A^T A)^{-1} A^T$ можно посчитать единожды при внедрении системы. Кроме того, при нахождении координат разряда в трехпунктовой системе нет необходимости пользоваться методом наименьших квадратов, а достаточно найти аналитическое решение методом Крамера. Для трехпунктовой системы в этом случае число обусловленности можно найти по формуле

$$\text{conde}_3(k) = \frac{1}{a} \left(10k^{-1} + 3k + \sqrt{(10k^{-1} + 3k)^2 - a} \right)^2, \text{ где } k = \frac{c}{R}.$$

Минимальное значение данной функции равно 1.73 и достигается при $k_3 = \sqrt{10/3}$. Аналогичные исследования для четырехпунктовой системы дают

$$\text{conde}_4(R, c) = \begin{cases} 8R^2/c^2, & \text{если } c \leq 2\sqrt{2}R \\ c^2/8R^2, & \text{если } c > 2\sqrt{2}R \end{cases}.$$

Минимальное значение данной функции равно 1, при $k_4 = 2\sqrt{2}$. Таким образом, систему уравнений, возникающую в дальномерном методе, с помощью масштабирования можно сделать хорошо обусловленной.

Были получены гарантированные оценки погрешности определения координат в дальномерном методе при регулярном размещении трех и четырех пунктов наблюдения. Располагая пункты наблюдения в вершинах равностороннего треугольника, удаленных на расстоянии R от начала координат, получим значения координат и их гарантированные погрешности:

$$x = \frac{r_1^2 - r_3^2}{2R}, \quad y = \frac{r_1^2 + r_3^2 - 2r_2^2}{2(2 + \sqrt{3})R}; \quad \Delta x \leq \frac{\delta}{R}(r_1^2 + r_3^2), \quad \Delta y \leq \frac{\delta}{(2 + \sqrt{3})R}(r_1^2 + r_3^2 + 2r_2^2).$$

В случае размещения пунктов наблюдения в вершинах квадрата, удаленных на расстояния R от начала координат, оценки координат и их гарантированные погрешности составят:

$$x = \frac{r_3^2 - r_1^2}{4R}, \quad y = \frac{r_2^2 - r_4^2}{4R}; \quad \Delta x \leq \frac{\delta}{2R}(r_1^2 + r_3^2), \quad \Delta y \leq \frac{\delta}{2R}(r_2^2 + r_4^2).$$

Таким образом, предложенный в работе дальномерный метод обеспечивает достаточную точность определения координат молниевых разрядов при приемлемых требованиях к точности измерений АГПД. При этом, целесообразно использование четырехпунктового метода с размещением пунктов наблюдения в вершинах квадратов со сторонами 90 км.

В Четвертой главе предложена архитектура многопунктовой системы местоопределения молниевых разрядов на основе сети автономных грозоотензигаторов-дальномеров. В работе приведено описание и функции отдельных блоков, рассмотрены связи между ними.

За основу процесса разработки программного обеспечения была взята методологии объектно-ориентированного анализа и проектирования, т.к. она позволяет разрабатывать хорошо структурированные и надежные в эксплуата-

ции системы. При этом учитывалось, что одним из характерных свойством рассматриваемой системы является асинхронность внешних событий (молниевых разрядов) по отношению к событиям внутри самой системы.

На основании выдвинутых требований к системе и принципов объектно-ориентированного подхода была создана архитектура сети АГПД, приведенная на рис. 5. В состав сети входят несколько СДВ АГПД, расположенных в различных пунктах наблюдения, вычисляющий сервер с базой данных о наблюдаемых явлениях, блок управления, и сеть передачи данных, используемая для связи между компонентами системы. Доступ пользователей к результатам наблюдений осуществляется с помощью разработанных форм через сеть Интернет.

Используемые в качестве сенсоров, АГПД осуществляют мониторинг электромагнитного поля Земли в СДВ диапазоне, регистрацию молниевых разрядов и определение его обобщенных координат (время регистрации t , дальность r , псевдопеленг φ и параметр u), и их передачу на вычисляющий сервер. По командам с вычисляющего сервера, АГПД осуществляют коррекцию показаний системных часов и выполнение тестов.

Вычисляющий сервер и блок управления реализованы на одном или нескольких компьютерах стандартной архитектуры с использованием разработанного программного обеспечения.

Блок управления позволяет администратору системы задавать конфигурацию вычисляющего сервера и управлять работой всей системы, устанавливать права доступа пользователей к данным, инициировать коррекцию показаний системных часов всех АГПД, проводить тестирование работоспособности системы в целом и ее отдельных элементов, а также отображать информации об их состоянии.

Вычисляющий сервер по полученным с АГПД результатам наблюдений идентифицирует наблюдаемые сигналы по отношению к конкретному грозовому разряду и производит отбор АГПД, результаты наблюдений которых будут участвовать в расчетах. Далее сервер вычисляет географические координаты разряда дальномерным или пеленгационно-дальномерным способом. Найденные координаты молниевых разрядов, вместе с полученными исходными данными записываются в базу данных.

Помимо этого вычисляющий сервер вырабатывает сигналы для коррекции системных часов всех АГПД и формирует команды к АГПД на выполнение тестовых заданий в фоновом режиме или по указанию блока управления. Результаты тестирования всей системы и ее отдельных элементов передаются на блок управления для анализа их администратором системы. Для синхронизации системных часов пунктов наблюдения используются поправки со стороны вычисляющего сервера относительно времени получения сигналов от зарегистрированных разрядов; таким образом, отпадает необходимость в использовании специализированных систем синхронизации.

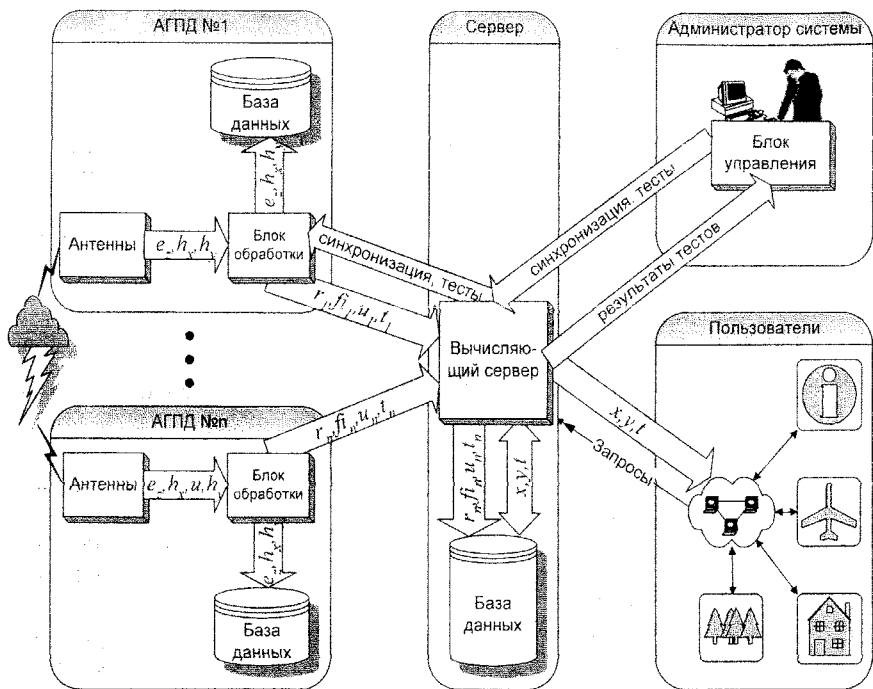


Рис. 5. Архитектура сети АГПД

При работе с клиентами, вычисляющий сервер регистрирует компьютеры пользователей и обеспечивает доступ к информации в соответствии с установленными правами и правилами, предоставляет по требованию пользователей либо оперативную информацию о грозовой обстановке, либо обеспечивает работу с архивом наблюдений. Для обеспечения взаимодействия компьютеров пользователей с вычисляющим сервером на них должно быть установлена клиентская часть программного обеспечения, разработанного в рамках диссертационной работы. В качестве сети передачи данных между компонентами системы может быть использована любая стандартная компьютерная сеть, в том числе и сеть Интернет.

В работе был предложен и реализован алгоритм синхронизации системных часов АГПД на пунктах наблюдения по принимаемым атмосферикам без использования сигналов точного времени с помощью статистической постобработки результатов измерений и показана возможность идентификации принадлежности сигналов принятых на разных станциях одному источнику.

Программное обеспечение для многопунктовой системы было разработано, прошло стендовые испытания, и частично внедрено в пилотном образце АГПД, разработанном по проекту МНТЦ 1822.

В **Заключении** подведены итоги проведенного исследования.

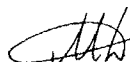
1. Предложенный в работе метод определения псевдопеленга на дипольный источник излучения по вертикальной составляющей электрического поля и двум ортогональным составляющим магнитного поля, имеет практически несмещенную оценку, величина дисперсии которой не превосходит отношения мощности шума к мощности сигнала более чем в три раза. Применение трех дополнительных пар антенн позволяет получать оценку псевдопеленга с дисперсией не превосходящей величины данного отношения.
2. Возможно определение отношения действующих высот антенн и оценка точностных характеристик автономных грозопеленгаторов-дальномеров на основе статистических данных.
3. Предложенный дальномерный метод определения местоположения молниевых разрядов, в отличие от пеленгационно-дальномерного не требует знания отношения действующих высот электрической и магнитных антенн и дает более точные гарантированные оценки координат.
4. Многопунктовая система местоопределения молниевых разрядов, построенная на основе предложенной архитектуры и разработанного программного обеспечения, дает возможность интегрировать отдельные автономные грозопеленгаторы-дальномеры в единую сеть, что повышает вероятность обнаружения молниевых разрядов, точность определения его координат и надежность функционирования системы мониторинга.

Приложения содержат копии свидетельств о регистрации программ, протоколы приемо-сдаточных испытаний разработанного программного обеспечения по методике, предложенной ЗАО НИИИТ-РК, акты об использовании программного обеспечения в пилотном образце грозопеленгатора-дальномера, описания архитектуры и фрагменты листинга разработанной системы.

Публикации автора по теме диссертации

1. Паниюков А. В., Малов Д. Н. Погрешность алгоритмов определения псевдопеленга дипольного источника излучения // Известия ВУЗов России. Радиоэлектроника. – № 1. – 2001. – С. 81–89.
2. Малов Д. Н., Паниюков А. В. Исследование точности пеленгования дипольного источника излучения // Алгоритмический анализ неустойчивых задач. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции. Екатеринбург, 26 февраля – 2 марта 2001. – Екатеринбург: Изд-во УрГУ, 2001. – С. 292 – 293.
3. Малов Д. Н., Паниюков А. В. Сеть однопунктовых грозопеленгаторов для локализации грозовых очагов // Обзорение прикладной и промышленной математики. – Том 8. – Вып. 2. – 2001. – С. 643–644.
4. Малов Д. Н., Паниюков А. В. Погрешность алгоритмов пеленгации // Труды 12-й Байкальской международной конференции «Методы оптимизации и их приложения». Иркутск, Байкал, 24 июня – 1 июля 2001. / Том 6: При-

- кладные задачи естествознания и динамики. – Иркутск: Иркутская государственная экономическая академия. – 2001. – С. 194–197.
5. Panyukov A.V., Malov D.N. The WWW software of multistation system for passive monitoring of thunderstorm activity // Proceedings of the 3rd International Workshop on Computer Science and Information Technologies. Ufa, Yangantau, Russia, September 21–26, 2001. Volume 2. – USATU. – 2001. – P. 20–23.
 6. Малов Д. Н. Программно-аппаратный комплекс местоопределения гроз // Обзорение прикладной и промышленной математики. – Том 9. – Вып. 1. – 2001. – С. 224.
 7. Малов Д. Н., Будуев Д. В. 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. / М: Актуальные проблемы фундаментальных наук. – 2002. – Том 1. – С. 10–12.
 8. Малов Д. Н., Панюков А. В. Влияние погрешности измерения дальности на точность определения положения дипольного источника излучения // 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 г. – Вып. 15. – С. 33–36.
 9. Panyukov A. V., Malov D.N. Influence of lightning location finder errors on accuracy of fixing by means of the multipoint systems // Proceedings 26th International conference on lightning protection . Vol. 2. (Krakow, Poland, September 1–6, 2002). – Krakow mining university. – P. 131–136.
 10. Панюков А. В., Малов Д. Н. Комплекс программ для сети автономных грозопеленгаторов-дальномеров Рег. №2002611854 (от 29.10.2002) Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем. Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. – №1(42) – 2003 – С. 57–58
 11. Малов Д. Н., Панюков А. В. Трехмерная локализация дипольного источника СДВ излучения // Труды 5-й Российской конференции по атмосферному электричеству. Владимир, 21–26 сентября 2003. / Том 1 – Владимир: Владимирский государственный университет. – 2003. – С. 341–344.
 12. Панюков А. В., Будуев А. В., Малов Д. Н. Системы пассивного мониторинга грозовой деятельности // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия математика, физика, химия – № 8(24). – 2003. – С. 11–21.
 13. Panyukov A. V., Malov D.N. Three-dimensional localization of VLF dipole radiant // Proceedings 26th International conference on lightning detection. Vaisala, Finland //www.vaisala.com/page.asp?Section=46280& Item=31954.



Малов Дмитрий Николаевич

**МНОГОПУНКТОВЫЕ СИСТЕМЫ 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

Подписано в печать 17.01.2005. Формат 60×84 1/16. Печать трафаретная.

Усл. печ.л. 0,93. Уч.-изд. л. 1. Тираж 110 экз. Заказ 512/92.

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