

# СИСТЕМЫ ПАССИВНОГО МОНИТОРИНГА ГРОЗОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

*А.В. Панюков, Д.В. Будуев, Д.Н. Малов*

Рассмотрен круг вопросов, связанный, во-первых, со способами регистрации и обработки атмосфериков с целью извлечения информации о координатах источника излучения, во-вторых, с созданием программно-аппаратных комплексов, обладающих достаточной для практических и исследовательских целей точностью, надежностью, быстродействием, удобством представления информации.

## **Введение<sup>1</sup>**

Вопросы определения местоположения молниевых разрядов радиотехническими методами представляют интерес, как для фундаментальной науки, так и для практики. Оперативная и достоверная информация о грозовых явлениях позволит решать многие проблемы геологии, метеорологии, физики атмосферы, изучения флуктуаций электромагнитного поля Земли. С практической точки зрения, обнаружение грозовых очагов и слежение за их перемещением важно, например, для грозозащиты линий электропередачи (ЛЭП), предупреждения поражения самолетов молниями.

Морские штормы, торнадо и ураганы, оказывающие большое воздействие на погодную обстановку и угрожающие жизни людей, обыкновенно сопровождаются значительным числом грозовых разрядов, что позволяет определять координаты таких атмосферных явлений с помощью систем местоопределения молниевых разрядов. Знание точных координат центров зарождения подобных природных явлений позволит определить причины их возникновения и предсказывать их появление. Так же перманентные очаги грозовой активности могут указывать на залежи полезных ископаемых или наличие скоплений подземных вод.

До сих пор, несмотря на значительный прогресс современной науки в исследовании мощных электрических разрядов, аналоги природных молний не могут быть воссозданы в лабораторных условиях. Поэтому пассивные системы местоопределения могут быть использованы для исследования структуры и этапов развития молниевых разрядов, определение причин их возникновения и разработки методов защиты от ударов молний.

Подавляющее количество аварий и отключений ЛЭП обусловлено прорывом молний сквозь тросовую защиту и поражением фаз, что наносит большой экономический ущерб. Кроме того, молния является источником помех, которые, распространяясь по линиям электропередачи, доходят до потребителя и могут вызвать сбои или отказы в работе приборов. Знание грозовой обстановки позволит диспетчерским службам ЛЭП принять решение о коммутации отдельных линий и аварийных работах.

Приближение воздушных судов к грозовому облаку может создать аварийную ситуацию. При поражении самолета молнией выходят из строя системы управления двигателями и оперением. Возникают наводки, нарушающие работу бортовых вычислительных машин, что приводит к непредсказуемым последствиям. Наиболее ответственными этапами полета являются взлет и посадка, которые должны выполняться в безопасных условиях. Поэтому наземным авиационным службам очень важно достоверно определить местоположение грозовых очагов в районе аэропорта, иметь прогноз их развития, чтобы выдать пилотам соответствующие указания.

Активным коммерческим потребителям информации о грозах могут быть строительные и страховые компании. Для страховых компаний требуется подтверждение факта удара молнии как состоявшегося события. А наличие многолетнего банка данных по грозовой активности в конкретном географическом районе позволяет проектировать системы грозозащиты зданий и определять страховую сумму для имеющихся и строящихся объектов с учетом их возможной поражаемости молнией.

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 01-07-90161 и 03-07-06052-мас).

В настоящее время используются как радиолокационные методы, так и пассивные методы местоопределения гроз. Метеоролокаторы оценивают состояние облаков косвенным путем по результатам измерения ориентации игольчатых кристалликов льда в электрическом поле облака. Пассивные радиотехнические системы используют то обстоятельство, что удар молнии порождает так называемый атмосферик – мощный электромагнитный импульс, который распространяется на большое расстояние с малым затуханием. Достаточно широкий и полный обзор пассивных методов местоопределения гроз содержится в работах [2; 3; 7; 21; 22]. В данной работе рассмотрен круг вопросов, связанный с отысканием конкретных способов обработки регистрируемых атмосфериков с целью извлечения информации о координатах источника излучения и созданием программно-аппаратных комплексов, обладающих достаточной для практических и исследовательских целей точностью, надежностью, быстродействием, удобством представления информации.

### Современные системы пассивного мониторинга

Известно несколько типов систем пассивного местоопределения гроз, основанных на мониторинге электромагнитного поля Земли в сверхдлинноволновом или ультракоротковолновом (далее СДВ или УКВ, соответственно) диапазонах. Наиболее распространенными являются многопунктовые системы местоопределения гроз [22], использующие либо пеленгационный, либо разностно-дальномерный методы, либо их комбинацию и предполагающие наличие 3-х и более пунктов наблюдения.

В **разностно-дальномерном** способе предполагается, что в каждом пункте наблюдения измеряется время регистрации сигнала от источника электромагнитного излучения. Разность между временами прихода сигнала на два пункта определяет гиперболу, и несколько пунктов определяют несколько гипербол, пересечение которых указывает на источник излучения. Пусть в пункте  $j \in J$  с неизвестными координатами  $(x_j, y_j)$  измерено время  $t_j$  появления сигнала от источника электромагнитного излучения,  $c$  – скорость света, тогда

$$(\forall j \in J) \quad \left( c^2 (t_j - t)^2 = (x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 \right).$$

Таким образом, разностно-дальномерный способ заключается в построении и решении этой системы нелинейных алгебраических уравнений с неизвестными  $t, x, y$ .

На разностно-дальномерном способе местоопределения основана работа широко распространенной системы NLDN фирмы Global Atmospheric (США) [25], работающей в УКВ диапазоне. К недостаткам данной системы следует отнести: необходимость высокоточной синхронизации системных часов на пунктах регистрации (вплоть до субмикросекундного уровня), работоспособность системы только в пределах прямой видимости, фиксацию только части разрядов, происходящих в зоне наблюдения, и возможное наличие зон с неоднозначным местоопределением разряда.

В случае использования для работы СДВ диапазона снимается условие прямой видимости разряда, но возникают сложности при идентификации принадлежности принятых в разных пунктах сигналов одному и тому же разряду. Возможные интервалы времени между моментами поступления сигналов на разные приемные пункты тем больше, чем длиннее база системы [7]. В пределах такого интервала времени может произойти несколько молниевых разрядов, что приведет к возникновению неопределенности в идентификации соответствия зарегистрированных сигналов конкретному молниевому разряду и, в конечном счете, к снижению вероятности правильного определения местоположения разряда. Вероятность отсутствия такой ошибки уменьшается экспоненциально с укорочением базы системы, но сближение приемных пунктов системы приводит к возрастанию погрешности местоопределения.

Сущность **пеленгационного** способа исходит из предположения, что возможно измерение азимута источника электромагнитного излучения из каждого пункта наблюдения. Местоположение молниевых разряда определяется как пересечение этих азимутов. Так, если в каждом пункте  $j \in J$  с известными координатами  $(x_j, y_j)$  возможно измерение азимута  $\psi_j$  источника электромагнитного излучения, то координаты  $(x, y)$  источника излучения должны удовлетворять системе линейных алгебраических уравнений

$$(\forall j \in J) \quad \left( (x - x_j) \sin \psi_j = (y - y_j) \cos \psi_j \right).$$

Такой способ, основанный на УКВ интерферометрах, реализован в системе SAFIR [24] фирмы Vaisala Dimensions. Из-за свойства УКВ сигнала распространяться только в пределах прямой видимости, эта и подобные ей системы имеют ограниченный радиус действия. Однако, это свойство, вместе с тем фактом, что УКВ импульсы коротки по времени, позволяет моделировать источники УКВ излучения, как точечные источники и определять их место в трех измерениях. Недостатками системы являются возможность работы системы только в пределах прямой видимости, уменьшение точности при увеличении базовых размеров системы, наличие зон с возрастающей ошибкой местоопределения и отсутствие оценок погрешности определения местоположения молниевых разряда.

В случае использования для определения азимутов рамочных СДВ пеленгаторов снимается условие прямой видимости разряда, но сильно возрастают погрешности определения пеленга, возникающие из-за ошибок, вызванных наличием аномальной составляющей в магнитном поле [3; 4]. В частности, из-за неперпендикулярности молниевых каналов измеряемая рамочными СДВ пеленгаторами величина  $\varphi$  может существенно отличаться от пеленга  $\psi$  на источник излучения. Интерференционные методы пеленгации в диапазоне СДВ в сущности сводятся к разностно-дальномерному методу.

Повысить вероятность и точность местоопределения при работе в диапазоне УКВ позволяет разработанная в начале 1990-х годов компанией Global Atmospheric (США) система ИМРАСТ [20; 22; 25], основанная на комбинации разностно-дальномерного и пеленгационного способов. В этом комбинированном способе с каждой пункта наблюдения на сервер передаются пеленг на молниевый разряд и время прихода сигнала. Сервер по этим данным идентифицирует принадлежность принятого атмосферика конкретному молниевому разряду, затем вычисляет координаты этого молниевых разряда и предоставляет пользователям системы доступ к результатам вычислений. Однако в новой системе осталась необходимость высокоточной синхронизации, к тому же потребовалось увеличение плотности расположения пунктов наблюдения.

Исторически сложилось так, что в России, где испытывался недостаток в повсеместно развитых и доступных системах связи, применение многопунктовых систем было затруднено и наибольшее внимание уделялось развитию однопунктовых методов.

Задачу **однопунктового местоопределения** в радиусе до 100 км можно решить, используя диапазон СДВ. При этом, поскольку длина волны существенно превосходит размеры молнии, то в качестве математической модели молниевых разрядов используется произвольно ориентированный электрический диполь. Вполне адекватной математической моделью земной поверхности для рассматриваемых расстояний и длин волн является бесконечно проводящая плоскость. Как показано в [4], ортогональные проекции компонент поля, индуцируемого в точке  $O$  электрическим диполем, размещенным над бесконечно проводящей плоскостью, равны

$$e_z(t) = q(t) \cdot v + q'(t) \frac{v}{\alpha} + q''(t) \frac{u}{\alpha^2},$$

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

$$e_x(t) = e_y(t) = h_z(t) = 0.$$

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

$$w \sin \varphi = \sin \theta \cos \theta_0 \sin \phi - \cos \theta \sin \theta_0 \sin \phi_0,$$

$$w \cos \varphi = \sin \theta \cos \theta_0 \cos \phi - \cos \theta \sin \theta_0 \cos \phi_0,$$

$$u = \sin \theta \cos (\varphi - \phi), \quad v \sin (\phi - \phi_0) = \sin (\varphi - \phi_0), \quad q(t) = \frac{w \alpha^2 p(t)}{(2\pi c^2 r)},$$

$p(t)$  – дипольный момент источника излучения, остальные параметры представлены на рис. 1.

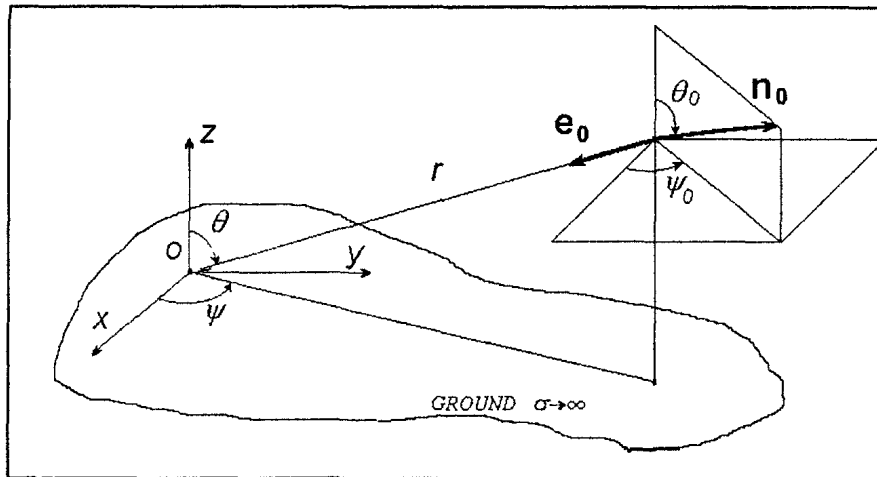


Рис. 1. Определение геометрических параметров задачи

В рассматриваемом случае компоненты  $e_z$ ,  $h_x$  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  $(r, \psi, \theta)$  точки размещения диполя. Оценка параметра  $\varphi$ , называемого в дальнейшем псевдопеленг, в отличие от пеленга  $\psi$ , может быть получена с помощью известной техники пеленгования. В частности, в инструментальном программном комплексе «Гроза» [5] данная оценка осуществляется с помощью алгоритма.

$$\cos(2\varphi) = \frac{h_{xx} - h_{yy}}{\sqrt{(h_{xx} - h_{yy})^2 + 4 \cdot h_{xy}^2}}, \quad \sin(2\varphi) = \frac{2h_{xy}}{\sqrt{(h_{xx} - h_{yy})^2 + 4 \cdot h_{xy}^2}}, \quad (1)$$

где

$$h_{xx} = \int_0^{\infty} [h_x(t)]^2 dt, \quad h_{yy} = \int_0^{\infty} [h_y(t)]^2 dt, \quad h_{xy} = \int_0^{\infty} h_x(t) \cdot h_y(t) dt, \quad h_x(t), \quad h_y(t)$$

– сигналы, наблюдаемые в рамочных магнитных антеннах.

Если принять гипотезу о вертикальности диполя ( $\theta_0=0$ ), то  $\psi=\varphi$  и  $u \approx v=1$ . Данная гипотеза была принята при разработке отечественного промышленного образца сверхдлинноволнового автономного грозопеленгатора-дальномера, далее – СДВ АГПД, «Очаг-2П» [1]. Опытная эксплуатация показала возможность применения такого рода однопунктовых систем, однако из-за невысоких точностных и вероятностных характеристик данный АГПД широкого применения не получил.

В работах [4; 6] предложен и исследован **прямой алгоритм** определения параметров  $u$ ,  $v$ , и  $\alpha$  в модели с произвольной ориентацией диполя:

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

где

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

$$h(t) = h_x(t) \cdot \sin \varphi - h_y(t) \cdot \cos \varphi.$$

По вычисленным параметрам  $u$ ,  $v$ ,  $\alpha$ ,  $\varphi$  можно определить расстояние до диполя  $r = c / \alpha$ , а также гарантированные интервальные оценки и вероятностные характеристики угловых координат точки размещения диполя [4]

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

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

Наиболее вероятные оценки для координат диполя в большинстве случаев совпадают с оценками, получаемыми при принятии гипотезы о вертикальности диполя:  $\psi = \varphi$ ,  $\theta = \arcsin u$ . Однако в общем случае, произвольная ориентация диполя вносит неопределенность в задачу определения угловых координат его местоположения по результатам однотоочечного наблюдения индуцируемого им электромагнитного поля.

Рассмотренная математическая модель и алгоритм оценки ее параметров по сигналам  $e_z$ ,  $h_x$  и  $h_y$  составили основу российско-американского проекта по разработке АГПД нового поколения, поддержанного Международным научно-техническим центром [26].

Неопределенность в определении местоположения диполя, характерную для однопунктового метода можно устранить, определяя параметры  $u$ ,  $v$ ,  $\alpha$ ,  $\varphi$  в двух или более точках [4]. Действительно, если  $(x, y, z)$  – декартовы координаты молниевоего разряда;  $(x_i, y_i)$  – заданные декартовы координаты  $i$ -й точки наблюдения,  $i \in J$ ;  $(r_i, \varphi_i, u_i)$  – соответствующие параметры молниевоего разряда, измеренные в  $i$ -й точке наблюдения; то имеют место равенства

$$(x_i - x) \cos \varphi_i + (y_i - y) \sin \varphi_i = r_i u_i, \quad i \in J, \quad (3)$$

представляющие систему линейных алгебраических уравнений с двумя неизвестными  $(x, y)$ . Если наблюдаемый диполь не является горизонтальным, то система (3) имеет полный ранг и может быть решена методом наименьших квадратов.

Рассмотренный метод, в дальнейшем называемый **дальномерно-пеленгационным**, для расчетов использует измеренные автономными грозопеленгаторами-дальномерами значения  $u$ ,  $v$ ,  $\alpha$ ,  $\varphi$ , а не значения пеленгов  $\psi$ , как классический пеленгационный метод. Это делает его нечувствительным к наличию аномальной составляющей в наблюдаемом магнитном поле. Кроме того, в нем отсутствует требование высокоточной синхронизации часов на пунктах наблюдения, характерное для разностно-дальномерного способа, а возможность оценки местоположения молниевоего разряда 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.

### Развитие систем пассивного мониторинга

Таким образом, за счет интеграции однопунктовых систем пассивного мониторинга грозовой деятельности в единую вычислительную сеть можно повысить вероятность обнаружения молниевоего разряда и точность определения его координат. Кроме того, анализ параметров молниевоего разряда  $(u_j, v_j, \alpha_j, \varphi_j)$ ,  $j \in J$ , в совокупности позволяет сделать прогноз развития грозовой деятельности, открывает новые возможности в исследованиях по метеорологии, гидрологии, геологии, атмосферному электричеству, а также в других сферах.

В 2001 г. РФФИ поддержал проект 01-07-90161 «Сетевое инструментальное программное обеспечение для многопунктовой системы пассивного мониторинга грозовой деятельности». Цель проекта – развитие инструментальных программно-аппаратных средств для однопунктовых и многопунктовых систем местоопределения грозовых очагов по результатам пассивного мониторинга электромагнитного поля в диапазоне СДВ. Основные задачи проекта:

- 1) анализ методов организации распределенной вычислительной сети АГПД;
- 2) разработка программно-аппаратного обеспечения, позволяющего
  - a) вырабатывать согласованное решение о месте, времени и других параметрах молниевоего разряда;
  - b) в режиме реального времени предоставлять информацию о грозовой обстановке и делать прогноз ее развития;
  - c) вести базу данных о грозовых явлениях, обеспечить свободный доступ через Интернет к интерфейсным формам формируемой базы данных.

**Автономный грозопеленгатор-дальномер**

*Погрешность алгоритмов определения псевдопеленга*

Так как инструментальная погрешность известных пеленгаторов оказывается существенно меньше погрешностей, обусловленных произвольностью ориентации эквивалентного дипольного источника излучения, то задача пеленгования молниевых разрядов считалась решенной. Выше были указаны способы исключения влияния ориентации диполя на оценку его размещения. В связи с этим актуальной становится задача повышения точности определения псевдопеленга  $\varphi$ .

В ходе исследований [9; 12; 13] была найдена дисперсия  $D\{\varphi\}$  оценки псевдопеленга с помощью алгоритма (1) при наличии аддитивного шума в наблюдаемых сигналах

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

где  $\sigma^2, S^2$  – мощность шума и сигнала соответственно. Таким образом, среднеквадратическое отклонение оценки псевдопеленга не превосходит отношения мощности шума к мощности сигнала т.е. относительной погрешности моделирования. Следовательно, алгоритм (1) является вполне устойчивым к погрешностям моделирования. Применение трех дополнительных пар рамочных антенн, ориентация которых отличается от ориентации используемых антенн на угол  $\pi/8, \pi/4$  и  $3\pi/8$  уменьшит дисперсию  $D\{\varphi\}$  еще в три раза.

*Экстремальный алгоритм*

Прямой алгоритм (2) был получен в предположении, что источник излучения является диполем, а подстилающая поверхность – плоскостью с бесконечной проводимостью. В силу неидеальности моделей и наличия шумов в наблюдаемых сигналах, приходится допускать наличие невязок в полученных уравнениях. Поэтому, с интуитивной точки зрения предпочтительней использовать принцип наименьших квадратов, в соответствии с которым параметры модели определяются из условия

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

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  $\mathbf{x}$ .

Пусть  $\lambda_0 \leq \lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \lambda_3 \leq \lambda_4$  – собственные числа матрицы  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{x}^{(i)}, i = 0, 1, 2, 3, 4$  – соответствующие собственные векторы. **Экстремальный алгоритм** [8] определения параметров  $u, v$ , и  $\alpha$  устойчивый к ошибкам в исходных данных состоит в вычислении

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

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

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

*Программно-аппаратное обеспечение АГПД*

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 частности, достаточен шаг дискретизации по времени

$5 \cdot 10^{-6}$  сек при числе уровней квантования  $2^{12}$ . При этом,  $2^7$  уровней необходимо для состоятельной оценки и  $2^5$  дополнительных уровней необходимо для вариации амплитуды сигналов.

Разрабатываемый АГПД [15; 19] состоит из антенной системы с блоком преобработки сигналов, локального канала связи и компьютера. Сигналы, принимаемые антенной системой, преобразуются в цифровую форму в блоке преобработки сигналов. Далее осуществляется цифровая фильтрация, буферизация и передача сигналов по каналу связи на компьютер

Блок преобработки вполне может быть реализован на основе одноплатного промышленного компьютера половинного размера РСА-6771, пассивной объединительной платы РСА-6104Р4 и многофункциональной высокоскоростной платы аналого-цифрового преобразования L-783. Компьютер РСА-6771 реализован на базе процессора Pentium III, содержит коммуникационное устройство – контроллер Ethernet 10/100Base-T, последовательные порты, контроллеры жесткого магнитного диска и внешнюю шину PCI. Объединительная плата РСА-6104Р4 обеспечивает соединение компьютера РСА-6771 и платы аналого-цифрового преобразования L-783 по внешней шине PCI.

Программное обеспечение [17] компьютера обеспечивает прием сигналов по локальному каналу связи, сохранение сигналов в базе данных, решение задачи идентификации параметров используемой математической модели. Кроме того, данное программное обеспечение поддерживает решение задач мониторинга и исследования грозовой активности, визуализацию и анализ накопленных данных, а также фоновое тестирования системы.

### Сеть АГПД

#### Дальномерный метод

В работах [16; 18] представлены результаты анализа точностных характеристик дальномерно-пеленгационного алгоритма (3). В случае двухпунктовой системы имеет место неустойчивость алгоритма в области близкой к линии, соединяющей точки наблюдения. В связи с этим сделан вывод о целесообразности использования трех и более пунктов наблюдения. Другим недостатком дальномерно-пеленгационного метода (3) является использование в системе уравнений параметра  $u$ , для нахождения которого необходимо знать достаточно точные значения действующих высот магнитных и электрические антенн в каждом пункте наблюдения. Получение значений действующих высот с заданной точностью является технически сложной задачей, требует длительного времени для сбора данных и наличия эталонного измерителя.

В ходе работы был построен дальномерный метод, не требующий предварительного знания действующих высот. Сущность метода в том, что декартовы координаты  $(x_i, y_i)$   $i$ -го пункта наблюдения  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $n \geq 3$ , декартовы координаты молниевоего разряда  $(x, y, z)$  и дальности  $r_i$  от пунктов  $i=1, 2, \dots, n$  до источника удовлетворяют системе уравнений

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

Если пункты наблюдения не лежат на одной прямой, то полученная система будет иметь полный ранг, ее наилучшее, в смысле метода наименьших квадратов решение будет равно:

$$\begin{pmatrix} r^2 \\ x \\ y \end{pmatrix} = (C^T \cdot C)^{-1} \cdot C^T \cdot B, \quad z = \sqrt{r^2 - (x^2 + y^2)},$$

где

$$C = \begin{pmatrix} 1 & -2x_1 & -2y_1 \\ 1 & -2x_2 & -2y_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & -2x_n & -2y_n \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} r_1^2 - (x_1^2 + y_1^2) \\ r_2^2 - (x_2^2 + y_2^2) \\ \dots \\ r_n^2 - (x_n^2 + y_n^2) \end{pmatrix} \quad (4)$$

Легко заметить, что при фиксированном множестве пунктов наблюдения матрица  $C$  постоянна, а неизвестные  $x, y, r^2$  определяются как линейные комбинация измеренных значений  $r_i^2$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ . Следовательно, еще на этапе проектирования системы легко построить оптимальный по точности алгоритм вычисления неизвестных.

## Программно-аппаратное обеспечение сети АГПД

Архитектура сети АГПД приведена на рис. 2. 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 [10; 14; 16]. Доступ пользователей к результатам наблюдений осуществляется с помощью разработанных форм через сеть Интернет.

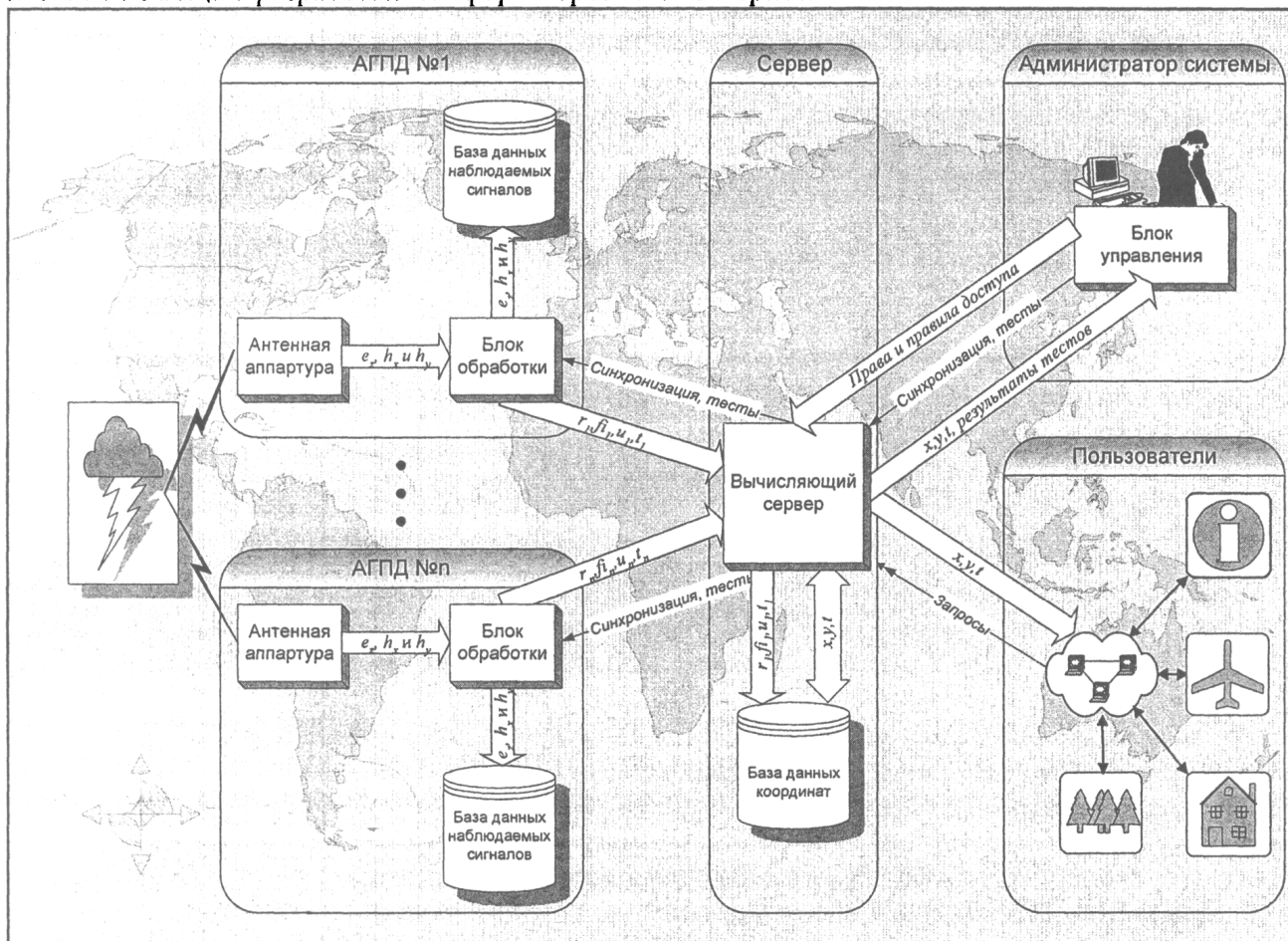


Рис. 2. Архитектура сети АГПД

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  $\varphi$  и параметр  $u$ ), и их передачу на вычисляющий сервер. По командам с вычисляющего сервера, АГПД осуществляют коррекцию показаний системных часов и выполнение тестов [11].

Вычисляющий сервер и блок управления реализованы на одном или нескольких компьютерах стандартной архитектуры с использованием программного обеспечения [23], разработанного в рамках проектов РФФИ 01-07-90161, 02-07-060090-мас, 03-07-06052-мас. 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 конкретному грозовому разряду, производит отбор АГПД, данные которых будут участвовать в расчетах, и в итоге, находит по этим данным декартовы координаты разряда в соответствии с (3) или (4). Полученные координаты соотносятся с земной поверхностью для получения географических координат молниевых разрядов, которые 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.

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 [23]. В качестве сети передачи данных между компонентами системы может быть использована любая стандартная компьютерная сеть, в том числе и сеть Интернет.

### Заключение

Создание нового поколения систем местоопределения гроз и расширение круга решаемых ими задач ведут не только к существенному пересмотру требований к их техническим характеристикам, но и к разработке новых математических моделей и алгоритмов анализа грозовых явлений, их трассирования и отображения, а также ведения архивов и их использования специалистами разных предметных областей. Решение данных проблем – цель будущих исследований.

### Литература

1. Грозопеленгатор-дальномер «Очаг-2П». – Л: Гидрометеиздат. – 1988. – 30 с.
2. Раков В.А. Современные пассивные радиотехнические системы местоопределения молний // Метеорология и гидрология. – 1990. – № 11. – С.118–123.
3. Кононов И.И., Петренко И.А. Современное состояние пассивных методов местоопределения гроз // Радиотехника и электроника. – 1992. – Т. 32. – № 7. – С. 1153–1167.
4. Panyukov A. V. Estimation of the location of an arbitrarily oriented dipole under single-point direction finding // Journal of geophysical research. – Vol. 101. – № D10. –P. 14,977–14,982. June 27, 1996. (USA)
5. Панюков А.В., Захаров Е., Королев М. Комплекс программ для системы местоопределения грозовых очагов в ближней зоне («Гроза»). // Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем. – Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. № 1(19), 1997. – М.: РосАПО. – Рег. № 970109. – С. 59.
6. Панюков А. В. Анализ погрешности прямого алгоритма определения дальности до электрического диполя // Известия вузов. Радиофизика, том XLII. – № 3. – 1999. – С. 266–277.
7. Александров М. С., Орлов А. В. Сравнительный анализ разностно-дальномерного и пеленгационного методов местоопределения грозовых очагов // Радиотехника и электроника. – № 3. – 2001. – С. 304–312.
8. Панюков А. В., Будуев Д. В. Алгоритм определения расстояния до местоположения молниевых разрядов // Электричество. – № 4. – 2001. – С. 10–14.
9. Панюков А. В., Малов Д. Н. Погрешность алгоритмов определения псевдопеленга дипольного источника излучения // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – № 1. – 2001. – С. 81–88.
10. Малов Д. Н., Панюков А. В. Сеть одноpunktовых грозопеленгаторов для локализации грозовых очагов. // Обзорение прикладной и промышленной математики. – Том 8. – Вып. 2. – 2001. – С. 643–644.
11. Будуев Д. В., Панюков А. В. Программное обеспечение полевых испытаний автономного грозопеленгатора. // Обзорение прикладной и промышленной математики. – Том 8. – Вып. 2. – 2001. – С. 545.
12. Малов Д. Н., Панюков 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.
13. Малов Д. Н., Панюков 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: Прикладные задачи естествознания и динамики. – Иркутск: Иркутская государственная экономическая академия. – 2001. – С. 194–197.

14. 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.
15. 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. – АРЕЕ. – P. 127–130.
16. Panyukov A.V., Malov D.N. Influence of lightning location finder errors on accuracy of fixing by means of the multipoint systems // International Conference on Lightning Protection. Krakow, Poland, 2nd–6th September 2002. Conference Proceedings. Vol. 1. – АРЕЕ. – P. 131–136.
17. Панюков А.В., Будуев Д.В. Библиотека методов определения местоположения дипольного источника излучения. Свидетельство РосАПО об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002610234. // Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем. Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. 1(39) – 2002. – С. 149–150.
18. 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.
19. Будуев Д.В., Панюков А.В. Однопунктовая система определения местоположения грозовых 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 г. – Вып. 19. – С. 28–34
20. Murphy M, Zaharescu R, Holle R. Three-dimensional Lightning Mapping Using LDAR II Systems // Proceedings 26th International conference on lightning protection. Vol. 2. (Krakow, Poland, September 1–6, 2002). – Krakow mining university. – P. 85–90.
21. Murphy M, Cummins K.L. Overview of Lightning Detection in the VLF, LF, and VHF Frequency Ranges // Proceedings of 26th International conference on lightning protection. Vol. 2. (Krakow, Poland, September 1–6, 2002). – Krakow mining university. – P. 100–110.
22. Kenneth L. Cummins, Martin J. Murphy. Overview of Lightning Detection in the VLF, LF, and VHF // Proceedings of 17th International Lightning Detection Conference.
23. Панюков А.В., Малов Д.Н. Комплекс программ для сети автономных грозопеленгаторов-дальномеров. Свидетельство РосАПО об официальной регистрации программы для ЭВМ №2002611854. // Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем. Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. – 1(42) – 2003. – С. 57–58.
24. SAFIR Total Lightning Localization and Thunderstorm Forecasting System – [http://www.vaisala.com/DynaGen\\_Attachments/Att2751/2751.pdf](http://www.vaisala.com/DynaGen_Attachments/Att2751/2751.pdf)
25. National Lightning Detection Network of Improved Performance from Combined Technology (IMPACT) Radio Frequency Antenna System [http://ghrc.msfc.nasa.gov:5721/sensor\\_documents/NLDN\\_antenna.html](http://ghrc.msfc.nasa.gov:5721/sensor_documents/NLDN_antenna.html)
26. Development and Investigation of the Single-Point System for Lightning Location in the Range of Super-Long Waves – <http://www.istc.ru/istc/db/projects.nsf/prjn/1822>.

*Поступила в редакцию 28 апреля 2003 г.*