

Применение параллельных и распределенных вычислительных систем в радиометеорологии

А.В. Панюков

Южно-Уральский государственный университет

В связи с внедрением новых технологий грозорегистрации и накоплением разнообразных данных о грозовой активности облаков возможным оказывается исследование микрофизических, динамических и электрических свойств электроактивных зон и их взаимосвязи с опасными явлениями, возникающими в наблюдаемых облаках. Обоснование предикторов опасных явлений, связанных с мощной конвекцией, имеет большое практическое значение при их реализации в национальной грозопеленгационной сети. Внедрение новых технологий грозорегистрации и сравнение получаемых при этом данных с данными существующих многоволновых активно-пассивных комплексов дает возможность исследовать микрофизические, динамические и электрические свойства электроактивных зон и их взаимосвязь с опасными явлениями в облачной атмосфере. Накопление данных и обоснование предикторов явлений, связанных с мощной конвекцией и имеющих электрическую природу, приобретает большое практическое значение для их реализации в национальной грозорегистрационной сети. Получаемый при этом колоссальный объем информации требует, для ее обработки и применения ультрасовременной вычислительной техники и современного программного обеспечения. Особенность применения вычислительной техники в радиометеорологии состоит в том, что первичная обработка и возможность её экспресс-анализа особенно в оперативной работе, должны осуществляться непосредственно в информационной радиоизмерительной системе, причем в реальном масштабе времени. В докладе отражены некоторые достижения в развитии аппаратного и программного обеспечения радиометеорологических систем.

1. Введение

Применение в метеорологии радиолокаторов работающих в пассивном режиме, принцип действия которых основан на приеме собственного излучения атмосферы, относится к концу 50-х началу 60-х годов прошлого столетия [1], [2]. Особую значимость для исследования облачности и осадков в метеорологии приобрела разработка методов, основанных на совместном применении активно-пассивных комплексов, в состав которых входят метеорологический радиолокатор, работающий в активном режиме, и микроволновая радиометрическая аппаратура. Создание таких комплексов было осуществлено совместно ИРЭ АН СССР и ЦАО в середине 60-х годов прошлого столетия [3].

За прошедшие 60-65 лет радиометеорология в мире получила бурное развитие. Достаточно указать, что в США каждые 1,5-2 года, регулярно проводятся радиометеорологические конференции. В настоящее время резко расширился круг задач, который пытаются решить при помощи радиолокации. Так помимо традиционных направлений, связанных с изучением процессов протекающих в различного типа и масштаба облачных образованиях и системах, появилось направление, связанное с изучением «тонкой структуры» и безоблачной атмосферы, недоступной для исследования при помощи иных средств и методов.

Расширение направлений, по которым развивается современная радиометеорология, стало возможным за счет резкого увеличения потенциала радиолокационных станций, их установки не только на Земле, но и на самолетах, спутниках.

2. Оперативное гидрометеобеспечение

В области оперативного гидрометеобеспечения в последние 10-15 лет все большее внимание фокусируется на практических вопросах грозового электричества: предупреждение об опасных явлениях погоды, связанных с мощными конвективными облаками (грозы, смерчи-торнадо, град, шквалы, избыточные осадки); прогноз поражения самолета молниями; защиты линий электропередач от попадания молний; уточнение количества выпадающих осадков при наблюдениях зон грозовой активности с ИСЗ; предупреждение о возможности возникновения лесных пожаров; прогноз эволюции тропических циклонов и другие [4] – [6]. Этому способствует развитие и внедрение в оперативную практику инструментальных методов обнаружения гроз - систем и датчиков типа ALDF, LDAR, SAF1R, OLS, US и т.д.

В результате начали накапливаться фактические данные об особенностях электрической активности мощных конвективных облаков, которые в силу определенных причинно-следственных связей и с некоторой заблаговременностью дают информацию о существенной микрофизической перестройке облака и возможных опасных явлениях, т.е. на их основе становится возможным формировать информационные признаки (предикторы) опасных явлений. К таким предикторам можно отнести резкое увеличение числа внутриоблачных молний (60 разрядов в минуту и более) за 10-15 мин до появления торнадо или за 5-10 мин до формирования опасных для авиации шквалов (микробарстов). В градовых облаках в период зарождения и выпадения града часто происходит реверс полярности молний с преимущественно отрицательной на положительную с возвращением обратно после окончания града. Очевидно, что исследование физических механизмов, временных параметров и устойчивости таких связей в различных синоптических и физико-географических условиях способствует повышению качества диагноза и прогноза степени опасности облаков и атмосферных процессов в целом.

В работе [7] приведены результаты наблюдений за изменениями электромагнитного излучения молниевых разрядов при развитии грозового очага в Подмоскowie и эволюции глубокого циклона с конечными координатами центра вблизи побережья Кольского полуострова. Предложены методика обработки и статистические оценки полученных результатов по характеристикам потока атмосфериков в виде разности и отношения между числами сигналов с разной полярностью. Установлено соответствие между аномальными изменениями этих характеристик при вихревых явлениях и генерацией атмосфериков преимущественно с отрицательной полярностью.

В работах [5] – [10] рассмотрены методические вопросы дистанционного зондирования грозовых облаков применительно к решению задач оперативного гидрометеобеспечения, включая активные воздействия на гидрометеорологические процессы. В связи с внедрением новых технологий грозорегистрации и накоплением разнообразных данных о грозовой активности облаков формулируется цель: исследование микрофизических, динамических и электрических свойств электроактивных зон и их взаимосвязи с опасными явлениями, возникающими в таких облаках. Обоснование предикторов опасных явлений, связанных с мощной конвекцией, имеет большое практическое значение при их реализации в национальной грозопеленгационной сети.

Таким образом, внедрение новых технологий грозорегистрации и сравнение получаемых при этом данных с данными существующих многоволновых активно-пассивных комплексов дает возможность исследовать микрофизические, динамические и электрические свойства электроактивных зон и их взаимосвязь с опасными явлениями в облачной атмосфере. Накопление данных и обоснование предикторов явлений, связанных с мощной конвекцией и имеющих электрическую природу, приобретает большое практическое значение для их реализации в национальной грозорегистрационной сети.

3. Системы пассивного мониторинга грозовой деятельности

Обзор состояния систем пассивного мониторинга грозовой деятельности к концу 2003 г. и демонстрация возможности использования систем местоопределения молниевых разрядов для пассивной радиолокации опасных метеорологических явлений представлены в работе [11]. Современные методы анализа поля, позволяющие определить параметры источника ЭМИ, характеризующие его размещение и ориентацию представлены в работах [12] – [22]. Математической моделью, адекватно представляющей внутриоблачные молниевые разряды, является электрический диполь над плоскостью с бесконечной проводимостью. Поэтому задача идентификации местоположения электрического диполя по его электромагнитному полю индуцируемому в точке наблюдения над плоскостью с бесконечной проводимостью актуальна. Работы посвященные данной проблеме публикуются в ведущих международных журналах [13], [14], [16], [21], [22].

В рамках проекта МНТЦ №1822 (<http://www.istc.ru/istc/db/projects.nsf>) разработан образец однопунктового грозопеленгатора-дальномера по патенту РФ №2230336 [20]. В результате проведенных полевых испытаний данного образца в период май – август 2004 г. было зарегистрировано более 2,5 млн. атмосфериков. Из них не более 10% были классифицированы как излучение от молниевых разрядов, остальные были классифицированы как предгрозное излучение.

Регистрация предгрозного излучения облаков (т.е. до первой вспышки молнии) однопунктовой системой грозолокации, для целей прогнозирования развития грозы, было обеспечено расширением динамического диапазона приемной аппаратуры и дальнейшим развитием математического и программного обеспечения [18]. Ранее подобное предгрозное излучение либо отфильтровывалось, либо обрабатывалось некорректно однопунктовыми системами местоопределения гроз.

База данных полевых испытаний дает большой экспериментальный материал для проверки адекватности моделей грозового очага и тестирования разрабатываемых программного обеспечения и устройства.

В целом результаты проекта продемонстрировали возможность и необходимость создания нового поколения систем местоопределения гроз и расширения круга решаемых ими задач [23]. Это ведет 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.

3.1. Однопунктовые системы

При использовании однопунктовых систем пассивного мониторинга грозовой активности возникает неустранимая ошибка [12] – [15] обнаружения пеленга на разряд, эквивалентный дипольный момент которого не является вертикальным. Отличие ориентации эквивалентного источника от вертикали наиболее характерно как раз для внутри облачных и межоблачных разрядов, образующих предгрозное излучение.

В работах [24] – [28] предложены методы снятия данной неопределенности с помощью карты плотности вероятности, для построения которой используется все множество зарегистрированных разрядов. Дополнительным ресурсом повышения качества решения данной задачи, является получение более точных значений параметров определяющих местоположение и ориентацию эквивалентного источника каждого разряда.

Другим способом устранения возникающей неопределенности, являются методы кластеризации [29], [30]. Подобный подход позволяет определить количество грозовых ячеек, их центры, выявить разряды входящие в каждую из ячеек и определить возможное размещение для каждого разряда. Область, которая покрыта кластером, является потенциально опасной.

3.2. Многопунктовые системы

Из требований надежности и живучести грозопеленгационной сети следует необходимость использования многопунктовых систем автономных грозопеленгаторов-дальномеров. Алгоритмы многопунктового определения параметров положения дипольного источника излучения описаны в работах [21], [31]. В патенте [32] предложен способ применимый для многопунктового анализа предгрозового излучения и архитектура многопунктовой системы местоопределения молниевых разрядов на основе сети автономных грозопеленгаторов-дальномеров [20]. В работе [33] рассмотрен круг вопросов, связанный с программным обеспечением [34] пространственно распределенной вычислительной системы на примере геоинформационной сети анализа и прогнозирования грозовой активности. Приведено описание и функции отдельных блоков, рассмотрены связи между ними. Очерчены перспективы развития системы и возможности интеграции с существующими аналогами.

Главной задачей решаемой многопунктовой географически распределенной системой является определение параметров положения дипольного источника излучения в реальном времени. Потребителями информации могут быть: метеослужбы, службы обеспечения безопасности полетов, электроэнергетические, строительные и страховые компании, службы по борьбе с лесными пожарами, научные организации по исследованию физики атмосферы. Основная цель системы – создание системы мониторинга электромагнитного поля Земли в реальном времени, предназначенной для определения координат молниевых разрядов, происходящих в наблюдаемом районе. Вторичными целями являются: (1) повышение уровня автоматизации сбора данных со станций наблюдения; (2) предоставление доступа пользователям как к оперативной информации о грозовой обстановке, так и к архиву наблюдений; (3) повышение вероятности обнаружения молниевых разрядов; (4) ведение базы данных о грозовых явлениях.

4. Развитие информационного обеспечения радиометеорологии

Таким образом, радиолокационная метеорология подошла к этапу, характеризующемуся тем, что она может и должна не только выполнять «наблюдательные функции», но и превращается в настоящую измерительную систему. Измерения того или иного метеорологического параметра осуществляется с указанием достоверности и точности его измерения. И в конечном итоге полученные результаты предоставляются в величинах, которыми обычно пользуются метеорологи или специалисты занимающиеся изучением строения и динамических процессов, протекающих в атмосфере. Во всех эмпирических измерениях, существует определенная вероятность погрешности между измеренным и истинным значением. На результаты измерения могут оказать влияние многие факторы. Для исследования этих факторов производятся многочисленные замеры. Затем эти данные можно представить в виде гистограммы и получить эмпирическое распределение вероятности данной величины. Исходя из центральной предельной теоремы, можно предположить, что величина может быть распределена по нормальному закону и тогда самой лучшей оценкой измеренной величины будет среднее значение, которое находится в центре распределения. Заметим, что для повышения статистической значимости оценки параметров следует использовать по возможности большее число алгоритмов.

Среди методов определения дальности до молниевых разрядов, использующие в качестве математической модели молниевых разрядов произвольно ориентированный электрический диполь, можно выделить прямой [13], [16], [11] и экстремальный методы [18], которые обладают достаточно высокими точностными характеристиками определения дальности и дают гарантированные оценки угловых координат эквивалентного дипольного источника, а при принятии дополнительных гипотез – их распределение вероятности. Увеличить число используемых алгоритмов для получения статистически значимых оценок можно за счет применения параметризации. Одним из способов такой параметризации [35], [36] является

применение параметризованного семейства полосовых фильтров для предобработки входных сигналов $E_z(t)$, $H_x(t)$, $H_y(t)$ от электромагнитного излучения молниевых разрядов, зарегистрированных с помощью антенной системы, содержащей вертикальную электрическую антенну и пару ортогональных рамочных магнитных антенн. В работах [35], [36], [37] описаны способы применения многопроцессорных систем для эффективного выполнения множества параметризованных алгоритмов.

Появление технологий вычисления в гетерогенных средах, а также соответствующего оборудования позволило значительно расширить область применения статистических методов [38], [39] для решения обратных задач. Появилась возможность решать в реальном времени неустойчивые задачи для которых потребовалось бы значительно больше времени в случае использования только ресурсов CPU мобильных систем. Техника параллельной реализации на гетерогенной вычислительной системе параметрических алгоритмов вычисления параметров электрического диполя и статистического оценивания множества значений этих параметров изложена в работе [40].

5. Заключение

В связи с внедрением новых технологий грозорегистрации и накоплением разнообразных данных о грозовой активности облаков потенциально возможным становится исследование микрофизических, динамических и электрических свойств электроактивных зон и их взаимосвязи с опасными явлениями, возникающими в таких облаках. Обоснование предикторов опасных явлений, связанных с мощной конвекцией, имеет большое практическое значение при их реализации в национальной грозопеленгационной сети. Сложность решения задачи в такой постановке состоит в том, что информация, полученная при помощи метеорологических радаров настолько объемна и неоднозначна, что ее очень сложно сопоставить с данными, которые получены при помощи традиционных метеорологических приборов и обычно применяемой методики измерений. Поэтому проблемы постановки таких сравнительных измерений требуют к себе особого внимания и в конечном итоге приводят к новым открытиям.

Литература

1. Жевакин С. А., Троицкий В. С. Радиоизлучение атмосферы и исследование поглощения сантиметровых волн. // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 1958. – №2.
2. Жевакин С. А., Наумов А. П. Поглощение сантиметровых и миллиметровых радиоволн атмосферными парами воды. // Радиотехника и электротехника. – 1964. – №8.
3. Башаринов А.Е., Горелик А.Г., Калашников В.В., Кутуза Б.Г. Определение параметров облаков и дождя по радиоизлучению на волне 0,8 см. // Тр. ЦАО, вып. 86. – 1969.
4. Мареев Е. А., Стасенко В. Н. Российские исследования в области атмосферного электричества в 2003-2007 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – Т. 45, № 55. – 2009. – С. 709-720.
5. Горелик А. Г. Радиолокационная метеорология и перспективы ее развития. // III Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» (Москва, 26–30 октября 2009 г.). – М: ИРЭ РАН. – 2009. – С. 400 – 404.
6. Стасенко В. Н., Гальперин С. М., Степаненко В. Д., Шукин Г. Г. Методология исследования грозовых облаков и активных воздействий на них // Проектирование и технология электронных средств. Спец. вып. – 2004. – С. 2–6.

7. Мигунов Н. И., Московенко В. М., Росанов Н. И. Наблюдения за молниевыми разрядами при вихревых явлениях // Метеорология и гидрология. – 2005. – № 1.
8. Кононов И. И., Ришар Ф. Методы пассивной локации гроз. / Тр. V Всерос. Конф. по атмосферному электричеству. – Владимир, 2003. – Т. 1. – С. 8-12.
9. Горбатенко В. П., Ипполитов И. И., Кабанов М. В. и др. Анализ структуры временных рядов повторяемости форм атмосферной циркуляции и грозовой активности // Оптика атмосферы и океана. – 2002. – Т. 15. № 8. – С. 693-697.
10. Кононов И. И., Петренко И. А., Снегуров В. С. Радиотехнические методы местоопределения грозových очагов. – Л.: Гидромеоиздат, 1986.
11. Панюков А. В., Будуев Д. В., Малов Д. Н. Системы пассивного мониторинга грозовой деятельности // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика, Физика, Химия. – 2003. – №8(24). – С. 11–20.
12. Panyukov A. V. Analytical and Computational Study of the Lightning Location under Single-point Observation of Electromagnetic Field // Proceedings 23rd International Conference on Lightning Protection . Vol. 1. (Firenze, Italy, September 23 – 27, 1996). – AEI. – P. 252 – 257.
13. Panyukov A.V. Estimation of the Location of an Arbitrary Oriented Dipole under Single-point Direction Finding // Journal of Geophysical Research. – 1996, June 27. – Vol. 101. – №D10.
14. Panyukov A.V., Strauss V.A. A Method to Determine Parameters of a Linear Functional Equation Set and its Application to Location Systems // Parameter Identification and Inverse Problems in Hydrology, Geology and Ecology. / J. Gottlieb and P. DuChateau (eds.). – Kluwer Academic Publishers, Printed in the Netherlands. –1996. – P. 199 – 209.
15. Panyukov A. V. Lightning Detection and Mapping Algorithms // Proceedings 24th International Conference on Lightning Protection . Vol. 1. (Birmingham, United Kingdom, September 14–18, 1998). – Staffordshire university. – P. 227–231.
16. Panyukov A.V. Analysis of the Error of a Direct Algorithm for Determining the Distance to an Electric Dipole. // Radio Physics and Quantum Electronics. – Vol. 42. – No 3. – 1999. – P. 239 - 248.
17. Панюков А. В., Будуев Д. В. Алгоритм определения расстояния до местоположения молниевых разрядов // Электричество – 2001, апрель. – Т. 4. – С. 10–14.
18. Панюков А. В., Будуев Д. В. Библиотека методов определения местоположения дипольного источника излучения // Программа для ЭВМ, базы данных, топология интегральных микросхем. Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам №2(1). – 2002. – С.149 – 150.
19. Панюков А. В., Будуев Д. В. Аналитическое и численное исследование устойчивости и точности алгоритмов определения дальности до дипольного источника СДВ излучения. // Известия Челябинского научного центра, вып. 4(28), 2004. – С. 15 – 20.
20. Панюков А. В., Файзулин Н. А., Будуев Д. В. Однопунктовая система местоопределения гроз в ближней зоне. – Патент РФ на изобретение №2230336. – 2004.
21. M. Popov, S.He. Identification of a Transient Electric Dipole over a Conducting Half Space Using a Simulated Annealing Algorithm // Journal of Geophysical Research. – 2000. – Vol. 105. – №D16. – P. 20821–20831.

22. B.Z. Taibin. An Approach to Define Parameters for Localization of Thunderstorm // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2006. – Vol. 48. – P.48–54.
23. Панюков А.В. Математическое и программное обеспечение распределенной сети грозопеленгаторов-дальномеров. // VI Российская конференция по атмосферному электричеству (Нижний Новгород, 1–7 октября 2007). – Нижний Новгород: ИПФ РАН. – С. 255 – 256.
24. Panyukov A.V., Avramenko A.G. Increasing Accuracy of Single Point Thunderstorm Locating System. // International Conference «Electrical and Control Technologies - 2006». Selected papers of conference – Kaunas. – 2006. – P. 63 – 65.
25. Богушов А.К., Панюков А.В. Применение методов вторичной обработки информации о грозовой активности для предупреждения аварий // Безопасность критических инфраструктур и территорий: Материалы III Всероссийской конференции и XIII Школы молодых ученых. - Екатеринбург: УрО РАН. – 2009. – С.117 – 118.
26. Богушов А.К., Панюков А.В. Методы вторичной обработки результатов мониторинга грозоопасности // VII Российская конференция по атмосферному электричеству (Санкт-Петербург, 24–28 сентября 2012). – СПб: ГГО им. Воейкова. – С. 40 – 42.
27. Богушов А.К., Панюков А.В. Вторичная обработка результатов пассивного мониторинга грозовой деятельности // Сборник трудов 40-й молодежной школы-конференции. 2009. Екатеринбург. С. 286–290.
28. Богушов А.К. Построение карты плотности вероятности по результатам пассивного мониторинга грозовой активности // I Научная конференция аспирантов и докторантов. Материалы конференции. Апрель, 2009, Челябинск. С. 281 – 284.
29. Богушов А.К., Панюков А.В. Размещение взаимосвязанных объектов в условиях неопределенности // IV Всероссийская конференция «Проблемы оптимизации и экономические приложения»: Материалы конференции (Омск, 29 июня – 4 июля, 2009) / Омский филиал Института математики СО РАН. – Омск: Полиграф. Центр КАН, 2009. – С.113.
30. Кононов И.И., Юсупов И.Е. Кластерный анализ грозовой активности.// Радиотехника и электроника, 2004, том 49, № 3, с.283–291.
31. He S., Popov M., Romanov V. Explicit Full Identification of a Transient Dipole Source in the Atmosphere from Measurement of the Electromagnetic Fields at Several Points at Ground Level // Radio Science. Vol. 35. No 1. 2000. P. 107–117.
32. Панюков А.В., Малов Д.Н. Способ определения местоположения молниевых разрядов и многопунктовая система для его реализации. – Патент РФ на изобретение № 2253133. – 2005.
33. Панюков А.В., Малов Д.Н. Математическое и программное обеспечение распределенной сети грозопеленгаторов-дальномеров // Параллельные вычислительные технологии (ПАВТ'2010): Труды международной научной конференции (Уфа, 29 марта – 2 апреля 2010 г.) [Электронный ресурс] – Челябинск: Издательский центр ЮурГУ, 2010. – С. 572–583. – Режим доступа <http://omega.sp.susu.ac.ru/books/conference/PaVT2010>
34. 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.

35. Панюков А.В., Богушов А.К. Параметризация алгоритмов идентификации электрического диполя. // Вестник Южно-Уральского государственного университета, №18 (277), серия: «Математическое моделирование и программирование», вып. 12. – С. 32 – 43.
36. Панюков А.В., Богушов А.К. Спектрально-статистический подход к проблеме идентификации параметров положения дипольного источника электромагнитного излучения // VII Российская конференция по атмосферному электричеству (Санкт-Петербург, 24–28 сентября 2012). Сборник трудов. – СПб: ГГО им. А.И. Воейкова. – С. 179 – 181.
37. Богушов А.К., Панюков А.В. Параллельная реализация комплекса программ для задачи определения параметров электрического диполя. // Параллельные вычислительные технологии (PaVT2011): труды международной научной конференции (Москва, 28 марта – 1 апреля 2011 г.) – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – 730 с. С. 427 – 432. – URL: <http://omega.sp.susu.ac.ru/books/conference/PaVT2011>
38. Peredo O., Ortiz Ju. Parallel implementation of simulated annealing to reproduce multiple-point statistics // Computers & Geosciences. – Vol. 37, Issue 8. – August 2011, P. 1110 - 1121.
39. Suchard M.A., et all. Understanding GPU Programming for Statistical Computation: Studies in Massively Parallel Massive Mixtures / M.A.Suchard, Q.Wang, C.Chan, J.Frelinger, A.Cron, M.West // Journal of Computational and Graphical Statistics. – Vol. 19(2). – 2010 <http://ftp.stat.duke.edu/WorkingPapers/10-02.pdf> .
40. Богушов А.К., Панюков А.В. Применение гетерогенных вычислительных систем для решения задачи идентификации параметров положения дипольного источника излучения // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. – Вып. 3(11). – С.17–22.