

Информационная технология автоматизированной обработки данных радиотомографии ионосферы

С.В. Трусов, А.А. Романов, А.В. Новиков, А.А. Романов

*Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения» (ФГУП «РНИИ КП»)
111024, Москва, Авиамоторная, 53
E-mail: romulas@rniikp.ru*

В работе представлены результаты разработки автоматизированной системы сбора и обработки данных радиопросвечивания ионосферы сигналами низкоорбитальных навигационных космических аппаратов. Предложена методика автоматизированной обработки данных на основе метода фазоразностной томографии. Приводится алгоритм управления удаленной сетью приемных установок и функциональная структура программно-математического комплекса. Представлены результаты обработки модельных и экспериментальных данных. Показано, что разработанная система позволяет реконструировать распределение электронного содержания в ионосфере с погрешностью около 15% в течение 1.5-3 часов после сбора данных радиопросвечивания приемными установками без участия исследователя.

Ключевые слова: томография ионосферы, автоматизированная система, информационная технология.

Введение

В последние десятилетия интенсивно развиваются методы радиотомографии ионосферы с использованием сигналов низкоорбитальных навигационных космических аппаратов (ННКА). Основным принципом этого вида радиотомографии является одновременный прием когерентных сигналов от одного искусственного спутника Земли (ИСЗ) на сети приемных установок и последующее восстановление распределения электронной концентрации в ионосфере по набору проекций интегральной характеристики. Размещение приемных установок вдоль направления пролета ННКА, имеющих приполярные орбиты, позволяет получать широтно-высотное распределение электронной концентрации в ионосфере протяженностью в первые тысячи километров и высотой около 1000 км. Первые эксперименты по радиотомографии ионосферы были проведены около 20 лет назад [1] и к настоящему времени хорошо проработана теоретическая сторона вопроса, и в значительно меньшей степени разработаны подходы к организации сбора и обработки данных томографии ионосферы.

Как правило, в современных системах томографического радиопросвечивания ионосферы сигналами ННКА время от регистрации сигналов ИСЗ на приемных установках до окончания тематической обработки составляет недели, и даже месяцы. Причиной низкой оперативности обработки данных в большинстве современных систем томографии ионосферы является наличие неавтоматизированных процедур в технологических цепочках сбора и/или обработки данных, лимитирующих общую скорость получения информационного продукта. Следовательно, для уменьшения времени получения результатов обработки данных радиотомографии ионосферы необходимо заменить или модифицировать те участки технологической цепочки обработки данных, которые требуют визуального анализа или качественной оценки для принятия решения. При этом необходимо организовать оперативный сбор данных с сети приемных установок.

Процесс сбора и обработки данных томографии ионосферы многостадийный, и требует на различных этапах: 1) сбора данных с приемных установок, 2) анализа характеристик данных; 3) принятия решения о необходимости тех или иных трансформаций; 4) оценивания качества решения задачи реконструкции. Поэтому для того, чтобы повысить оперативность получения информации о распределении электронной концентрации в ионосфере, необходимо разработать автоматизированную систему сбора и обработки данных томографии. Для создания подобной системы требуется разработать методику автоматизированной обработки данных томографии ионосферы, алгоритмизировать взаимодействие центра обработки данных и сети приемных установок, разработать программно-математический комплекс, позволяющий реализовать сбор, обработку, хранение и представление информации.

Методика автоматизированной обработки данных радиотомографии ионосферы

Разработанная методика базируется на методе фазоразностной томографии [2]. Параметры методики были получены в результате численного моделирования проведенного для геометрии сети приемных установок, расположенной на о. Сахалин [3]. Данная сеть состоит из 3 приемных установок, расстояние между которыми составляет около 250 км. Методика состоит из нескольких этапов:

1. Из данных, полученных с приемных установок производится выделение полезного сигнала на основе эмпирически полученных граничных условий (дисперсия значений разностной фазы в скользящем окне $N=10$ меньше 1 и длительность данного участка больше 60 сек.);

2. Осуществляется систематизация имеющихся данных по сеансам радиопросвечивания. Принадлежность данных к одному сеансу радиопросвечивания характеризуется единым идентификатором ИСЗ и максимальной разницей времени начала записи на всех приемных установках не превышающей 35 минут;

3. Рассчитывается производная фазы по времени. Перед расчетом производной из данных удаляется высокочастотная компонента (>0.1 Гц). После расчета данные прореживаются, для расчетов используется каждое восьмое измерение;

4. С использованием орбитальной модели SGP4 [4] рассчитывается ряд положений ИСЗ на орбите для времени сеанса радиовидимости с дискретностью, соответствующей частоте регистрации зондирующего сигнала – 6.25 (50/8) Гц. Для каждого измерения зондирующих сигналов из файлов данных определяется соответствующее положение спутника;

5. Как только определены положения путей сигналов в пространстве, производится отбраковка данных, избыточных при решении задачи томографии. Отбраковке подлежит часть сигналов, принадлежащих наиболее южной приемной установке, если наименьшие широты ИСЗ, зафиксированные для нее, являются наименьшими значениями для всех приемных установок цепочки. Отбраковке подвергаются те сигналы наиболее южной приемной установки, которые характеризуются широтой ИСЗ, не превышающей минимального значения широты ИСЗ для более северных приемных установок. С использованием аналогичных соответствующих условий производится отбраковка сигналов с наиболее северной приемной установки;

6. На основе положения путей сигналов в пространстве и кусочно-планарной аппроксимирующей функции формируется матрица проекционного оператора для сетки высотой 1000 км и размером ячейки 50 км по горизонтали и 25 км по вертикали. Количество ячеек по горизонтали определяется из геометрии конкретного сеанса радиопросвечивания.

7. Оптимальное начальное приближение подбирается путем формирования конечного множества модельных распределений электронной концентрации и анализа соответствия рассчитываемых на их основе интегральных значений измеренным;

8. На основе матрицы проекционного оператора, вектора начального приближения и вектора измеренных значений формируется система линейных уравнений (СЛУ) $Ax = b$. Решение СЛУ осуществляется с помощью итерационного алгоритма (ART с релаксацией). Завершение

итерационного процесса происходит в случае уменьшения скорости изменения ошибки восстановления правой части СЛУ до значения 0.001 или после завершения 50 итераций. Как только рассчитаны значения электронной концентрации в узлах сетки, реконструкция распределения электронной концентрации завершена.

В результате проведенных исследований были формализованы и определены численные параметры каждого этапа предложенной методики. Создано программно-математическое обеспечение, реализующее оперативную обработку данных томографии ионосферы в автоматическом режиме.

Управление удаленной сетью приемных установок

Задача организации оперативной передачи данных решена путем подключения ЭВМ приемных установок и центра обработки данных к глобальной сети Интернет [5]. Для типовой скорости передачи информации региональными провайдерами Интернет 128 Кбит/с время передачи данных одного сеанса радиопросвечивания (220 Кб) составляет 14 секунд.

Для обеспечения своевременного включения и выключения приемных установок необходимо периодически обеспечивать их актуальным расписанием радиовидимости используемых ИСЗ. Предлагаемое решение базируется на расчете параметров орбиты ННКА на основе модели орбитального движения SGP4. На основе координат приемных установок рассчитывается время входа необходимых ИСЗ в зону радиовидимости каждой из них. После формирования расписания радиосеансов для каждой приемной установки на определенный период времени, отбраковываются записи о пролетах ИСЗ, которые не видны со всех приемных установок одновременно. Сформированные таким образом расписания радиосеансов передаются на приемные установки.

Задача контроля работоспособности приемных установок решается периодическим получением данных о работе приемного комплекса и анализа этих данных на предмет наличия нештатных ситуаций. Основными критериями работоспособности являются: своевременная регистрация данных радиопросвечивания и круглосуточная доступность ЭВМ приемной установки через сеть Интернет.

Предложенные подходы к организации управления приемными установками можно реализовать в виде алгоритма, состоящего из трех основных процедур – расчета расписаний радиовидимости ИСЗ, получения новых данных и контроля работы приемных установок. Необходимость выполнения той или иной процедуры определяется менеджером заданий в соответствии с заранее определенными правилами. Менеджер заданий работает постоянно и с заданной периодичностью проверяет расписание заданий. Если текущее время совпадает с расписанием запуска одной из процедур, инициируется процесс, отвечающий за выполнение данной процедуры.

Программно-математический комплекс сбора и обработки данных радиопросвечивания ионосферы

Для создания автоматизированной системы сбора и обработки данных томографического радиопросвечивания ионосферы помимо разработанных решений необходимо также реализовать хранение и представление информации, решить вопросы информационного обеспечения процедур сбора и обработки баллистической информацией, организовать контроль выполнения процессов сбора и обработки информации, а также управление процессами в системе. С этой целью был разработан программно-математический комплекс (ПМК), решающий весь спектр задач системной обработки данных томографии ионосферы.

Структура ПМК состоит из функциональных сегментов, отвечающих за сбор, обработку, хранение и представление информации, а также управление и контроль выполнения процессов сбора и обработки информации (рис. 1). Функциональность каждого сегмента обеспечивается работой одного, а чаще - нескольких программных модулей.

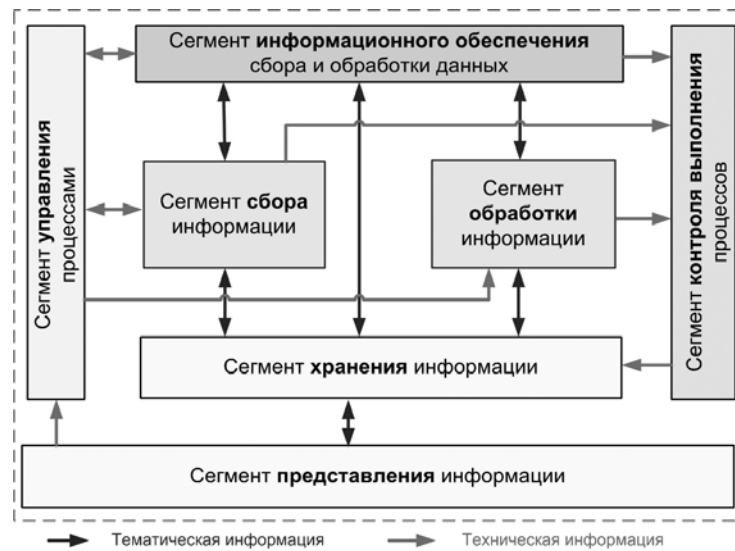


Рис. 1. Функциональная схема программно-математического комплекса сбора и обработки данных фазоразностной томографии ионосферы

Пользовательский web-интерфейс позволяет получать доступ к результатам обработки данных, а также выполнять управление процессами сбора и обработки в интерактивном режиме с любой ЭВМ, подключенной к сети Интернет [6].

Для обеспечения возможности последующего масштабирования приемного сегмента системы в ПМК был реализован подход к организации данных в системе хранения информации, позволяющий организовать сбор и обработку информации с множества томографических цепочек [6]. Подход основан на использовании специальной структуры метаданных, в которой каждая приемная установка характеризуется набором иерархических и географических характеристик, позволяющей системе работать с единственной томографической цепочкой, как с элементом множества.

Данный программно-математический комплекс является основой информационной технологии сбора и обработки данных томографического радиопросвечивания ионосферы, обобщенная функциональная схема которой отражена на рис.2.

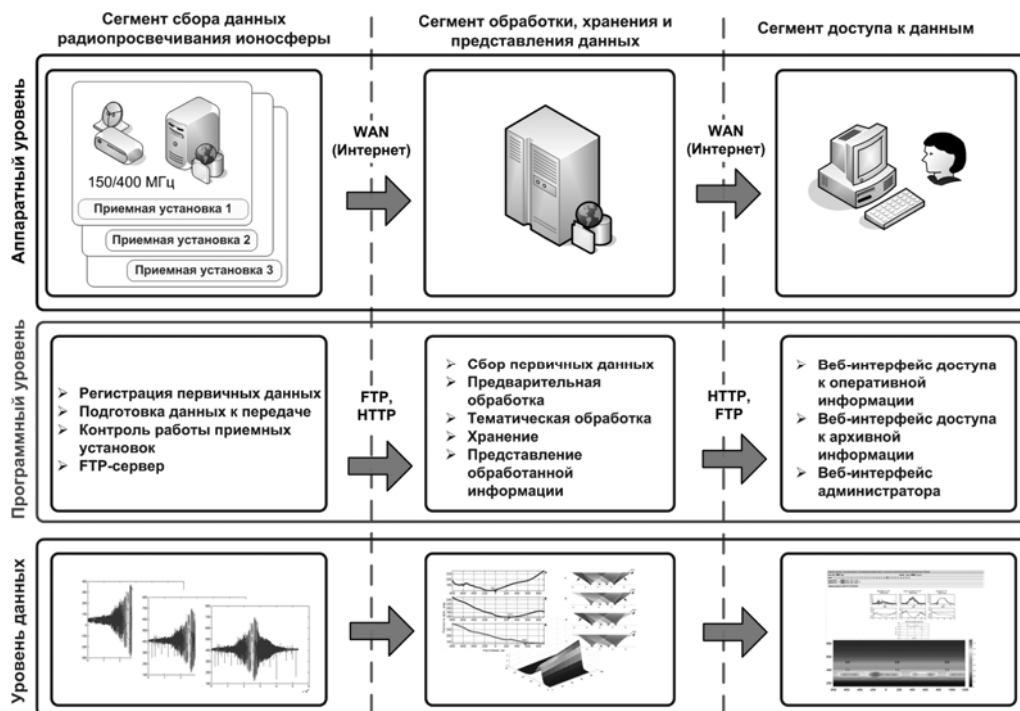


Рис. 2. Обобщенная функциональная схема информационной технологии

Результаты численного моделирования реконструкции распределения электронной концентрации в ионосфере

Для оценки качества тематической обработки данных радиопросвечивания с использованием предложенной методики, были проведены реконструкции модельного распределения электронной концентрации в ионосфере с помощью разработанного программно-математического комплекса для условий, идентичных реальной геометрии эксперимента, описанной в работах [3,5]. Ошибки реконструкции оценивались путем расчета невязки между исходной и восстановленной функциями и определялись следующими соотношениями [2]:

$$\delta_2 = \frac{\sqrt{\sum_i (F_i - \tilde{F}_i)^2}}{\sqrt{\sum_i F_i^2}}; \quad \delta_m = \frac{\max_i |F_i - \tilde{F}_i|}{\max_i |F_i|},$$

где F - значение исходной и \tilde{F} - значение

восстановленной функции.

Результаты исследования показали, что при реконструкции модельного распределения, описывающего возмущенное состояние ионосферы (наличие неоднородностей и горизонтального градиента электронной концентрации) ошибки восстановления значений электронной концентрации характеризуются величинами $\delta_2 = 0.08$ и $\delta_m = 0.10$ и уменьшаются по мере упорядочения структуры ионосферы.

Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования качества работы разработанной системы сбора и обработки данных радиопросвечивания ионосферы проводились с использованием сети приемных установок расположенных на о. Сахалин [3,5].

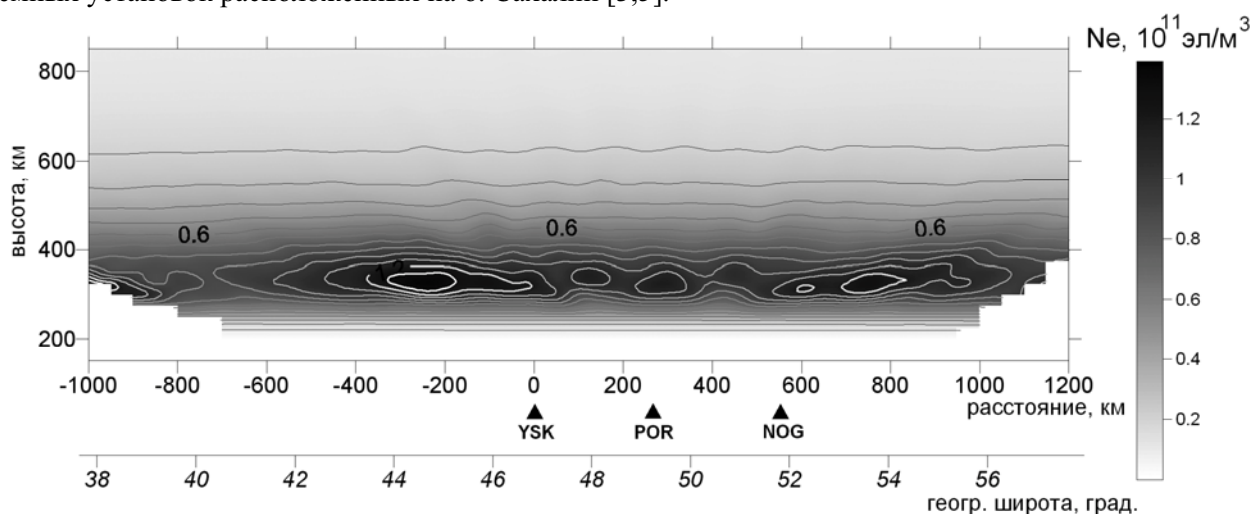


Рис. 3. Распределение электронной концентрации 29.07.2007 0:30 (время местное) в районе о. Сахалин

Результаты работы системы сбора и обработки данных радиопросвечивания ионосферы представляют собой высотно-широтное распределение электронной концентрации (рис. 3). На рисунке 4 представлены результаты сравнения данных, полученных ионозондом Вакканай (Wakkanai), расположенным на о. Хоккайдо, в 150 км к югу от томографической цепочки, с данными, полученными в результате работы программно-математического комплекса. При анализе использовались данные 90 реконструкций, 50 из которых были получены в июле-августе 2007 г., и 40 в январе 2008 г. Для сопоставления с данными ионозонда максимальные значения электронной концентрации в районе расположения ионозонда пересчитывались в значения

критической частоты $foF2$. Показано хорошее соответствие результатов определения $foF2$, средняя невязка составила 15%, $\delta_2 = 0.13$. Максимальные невязки 41% и 46% получены для двух реконструкций. Коэффициент корреляции между двумя рядами данных $R=0.84$. Эти результаты хорошо согласуются с оценками точности реконструкции электронной концентрации на основе данных ионозондов, полученными в независимых исследованиях ($\delta_2 = 0.9-0.11$) [2]. Независимые оценки были получены с применением фазоразностного подхода и без использования автоматизированной методики обработки. Согласованность этих результатов свидетельствует о том, разработанная методика позволяет в автоматизированном режиме восстанавливать распределение электронной концентрации в ионосфере с точностью, характерной для метода фазоразностной томографии.

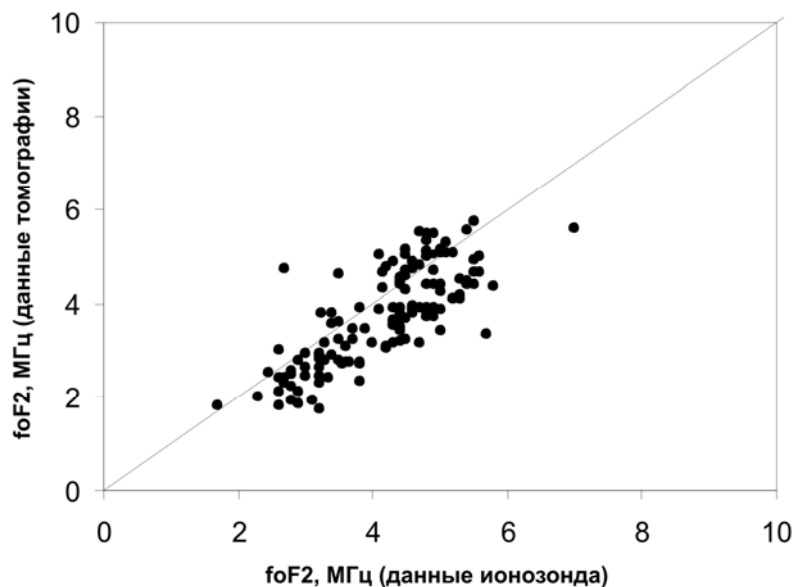


Рис. 4. Сопоставление значений критической частоты ($foF2$), полученных в результате томографии ионосферы с данными ионозонда Вакканай

Оперативность получения томографических реконструкций распределения электронной концентрации с помощью разработанной системы составляет 1.5-3 часа. Подобная скорость автоматизированного сбора и обработки не имеет аналогов в России и не уступает лучшим зарубежным образцам.

Выводы

В результате проведенных исследований была разработана методика автоматизированной обработки данных фазоразностной томографии ионосферы, позволяющая реконструировать распределение электронного содержания без участия исследователя с погрешностью около 15%.

Предложенный алгоритм управления удаленной сетью приемных установок, позволяет автоматизировать решение задач сбора данных радиопросвечивания ионосферы, информационного обеспечения и контроля работоспособности приемных установок.

Разработан программно-математический комплекс автоматизированного сбора и обработки данных фазоразностной томографии ионосферы, способный восстанавливать распределение электронной концентрации в ионосфере в течение 1.5-3 часов после регистрации зондирующих сигналов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №08-07-12014-офи.

Литература

1. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д. Томография ионосферы. М.: Наука, 1991, 210 с.
2. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 336 с.
3. Романов А.А., Трусов С.В., Романов А.А., Крючков В.Г. Исследование ионосферных неоднородностей методом фазоразностной томографии в дальневосточном регионе России // Исследование Земли из космоса, 2008. №2. С. 14-20.
4. Kelso T.S. Real-World Benchmarking // Satellite times, 1996. November/December, P. 80-82.
5. Романов А.А., Романов А.А., Трусов С.В., Урличич Ю.М. Современные подходы к созданию автоматизированной системы регистрации ионосферных предвестников землетрясений по спутниковым данным // Космонавтика и ракетостроение, 2006. №1. С.167-172.
6. Трусов С.В., Романов А.А., Романов А.А., Новиков А.В. Современные подходы к созданию программного комплекса сбора и обработки данных спутникового мониторинга ионосферы и ионосферных предвестников землетрясений // Труды научно-технической конференции “Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий” 19-21 июня 2007 г., М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. С. 284-290.

Information technology of automated processing ionosphere tomography data

S.V. Trusov, A.A. Romanov, A.V. Novikov, A.A. Romanov

Russian Institute of Space Device Engineering

The results of development of automated system aggregation and processing ionospheric data on LEO navigation satellites signals are presented. The new methodic of automated data processing based on phase-difference tomography, the remote receiving stations management algorithm and functional structure of developed software are described. The results of model and experimental data processing are presented. It shown that developed system allows getting reconstructions of ionosphere electron density distribution with 15% error within 1.5-3 hours after satellite signals registration without human attraction.

Keywords: ionosphere tomography, automated system, information technology.