

УДК 629.783: 550.388.2

© Яковлев О.В.
Yakovlev O.**ДВОЙНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАВИГАЦИОННЫХ
КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ
ДАННЫХ О СОСТОЯНИИ ИОНОСФЕРЫ****DUAL USE TECHNOLOGY NAVIGATION SPACE SYSTEMS
FOR DATA ON THE STATE OF THE IONOSPHERE**

Аннотация. В настоящей статье основное внимание уделено рассмотрению существующих и перспективных технологий сбора, обработки и анализа информации о состоянии ионосферы Земли, получаемой от навигационных космических аппаратов с целью их использования для решения широкого круга научных и прикладных задач.

Annotation. This article focuses on the review of existing and prospective technologies for collecting, processing and analyzing information about the state of Earth's ionosphere, from navigation satellites to be used for a wide range of scientific and applied problems.

Ключевые слова. Навигационные космические аппараты, ионосферные возмущения, ГЛОНАСС, GPS.

Key words. Navigating the spacecraft, ionospheric disturbances, GLONASS, GPS.

В работе [1] указывается, что ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система) разрабатывалась как система двойного использования, предназначенная для нужд Министерства обороны и гражданских потребителей. В работе [2] также отмечается, что «каждый день появляется информация о новых, иногда самых неожиданных областях применения космических навигационных систем».

Информация о состоянии ионосферы находит своё применение при решении широкого круга прикладных задач, часть из которых рассмотрена в работах [3-7]. Из краткого рассмотрения этих задач видно, что данные ионосферных измерений, получаемые с помощью навигационных космических аппаратов (НКА), успешно применяются для решения задач прогнозирования землетрясений, регистрации фактов пуска ракет, определения координат взрывов, определения начала магнитных бурь и целого ряда других задач как для приложений в воен-

ной сфере, так и в широких областях научной и практической деятельности. В этой связи технологии получения ионосферных данных от космических навигационных систем можно рассматривать как технологии двойного применения.

Особый интерес для решения целого ряда прикладных задач с использованием ионосферных данных представляют возможности приема сигналов навигационных космических аппаратов (НКА). Существующие весьма редкие сети ионосферных детекторов, такие как ионозонды, радиотрассы наклонного зондирования и радары некогерентного рассеяния, не могут обеспечить необходимое пространственно-временное разрешение, непрерывность и глобальность мониторинга ионосферных возмущений.

В настоящее время данные с приемников GPS (Global Position System) с временным разрешением 30 с уже представлены в Интернете для свободного использо-

Яковлев Олег Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник отдела нелинейного анализа и проблем безопасности Вычислительного центра им. А.А. Дородницына Российской академии наук, тел. 8 (499) 135-61-95.

Yakovlev Oleg – cand. tech. sci, higher senior officer, leading research assistant, department of nonlinear analysis and safety problem, A.A. Dorodnitsyn Computing centre, Russian academy of sciences, tel. 8 (499) 135-61-95.

вания. Идет интенсивный процесс интеграции системы GPS с российской навигационной системой ГЛОНАСС, а в перспективе такая интеграция предполагается и с европейской навигационной системой GALILEO.

В каждый момент времени в зоне видимости каждого приемника GPS находятся не менее 5-8 НКА GPS (или 10-15 НКА с использованием совмещенных приемников GPS-ГЛОНАСС). В последние годы стали доступными данные GPS-приемников, размещенных на спутниках с низкими околоземными орбитами (LEO, TOPEX/POSEIDON, CHAMP). Таким образом, ионосфера Земли просвечивается множеством лучей «приемник-НКА» с разнообразным положением приемников. Это делает заманчивым использование набора станций сети GPS и ГЛОНАСС для различного рода исследований.

Разработка технологий использования GPS-измерений для дистанционной диагностики ионосферы ведется по нескольким направлениям. Создана технология GIM (Global Ionospheric Maps) — построение глобальных ионосферных карт абсолютного вертикального значения полного содержания электронов в атмосфере (ПЭС). Для хранения и передачи карт ПЭС в цифровом виде разработан специальный стандартный формат IONEX (стандарт файлов по технологии Global Ionospheric Maps). Каждый файл IONEX содержит мировые карты абсолютного вертикального ПЭС и соответствующие им карты погрешностей вычисления ПЭС за одни сутки по шкале мирового времени UT с временным разрешением 2 ч. Карты ПЭС в формате IONEX представлены на сайте <ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex>.

Развиваются методы радиотомографии ионосферы по GPS-сигналам. Возможность использования большого числа зондирующих лучей существенно повышает разрешение и точность реконструкции сечений ионосферы. Разрабатываются как традиционная томография с расположением приемников на поверхности Земли, так и ее модификации для случая размещения GPS-приемников на низкоорбитальных ИСЗ.

Находят свое применение и радиозатменные методы восстановления профиля коэффициента преломления. В этих методах также используется прием сигналов НКА GPS как на земной поверхности, так и на околоземной орбите. Профиль коэффициента преломления может быть пересчитан затем в высотные профили метеорологических параметров (давление, плотность, температура).

В соответствии с программой «Космическая погода» ряд университетов США ведет разработку ассимиляционных моделей для оперативного прогноза параметров

ионосферы (например, модель GAIM — Global Assimilation of Ionospheric Measurements). В таких моделях теоретические распределения электронной концентрации корректируются доступными ионосферными данными (измерения ПЭС по сигналам GPS, профили распределения концентрации заряженных частиц по данным ионозондов, радаров некогерентного рассеяния, ракетным измерениям и т.д.), обеспечивая достаточную скорость компьютерных расчетов. В связи с этим измерения ПЭС на сети приемников GPS становятся сейчас базовым источником информации для оперативных моделей.

При практическом использовании технологии GPS-зондирования верхней атмосферы и ионосферы необходимы сведения об имеющихся источниках информации и архивах характеристик сигналов НКА системы GPS. Эти данные имеются в IGS (International Service for Geodynamics), куда они поступают от национальных агентств с целью обеспечения работоспособности глобальной навигационной системы GNSS (Global Navigation Satellite System). Здесь и в дальнейшем под глобальной навигационной спутниковой системой GNSS подразумевается объединение ГЛОНАСС, GPS, GALILEO и других навигационных систем, разрабатываемых в рамках международных и национальных проектов в общую навигационную систему коллективного использования.

IGS [8] представляет собой лишь один из десятка сервисов IAG (International Association of Geodesy), объединяющих службы лазерной локации, вращения Земли, изучения приливов и уровня моря, гравитационного поля и геоида, измерения времени и др.

Информацию о координатах зарегистрированных GPS-приемников можно получить по адресу: <http://lox.ucsd.edu/cgi-bin/allCoords.cgi>. Станции наблюдений IGS ежечасно передают RINEX (Receiver Independent Exchange Format) файлы в центры накопления данных. Внутренняя структура RINEX-файлов, в которых зашифрованы данные о характеристиках GPS-сигналов, достаточно сложна. RINEX-файл содержит измеренные GPS-приемником параметры сигналов всех космических аппаратов, находящихся в зоне радиовидимости приемника: альманах созвездия КА, значения фазы для одной или обеих несущих частот, значения псевдодальности, метки времени, сведения о работоспособности бортовой аппаратуры КА и др. В отдельный навигационный RINEX-файл объединяются эфемериды КА, необходимые для вычисления координат спутников.

Так, RINEX-файлы с GPS-приемников глобальной сети IGS хранятся на HTTP-сервере SOPAC <http://lox.ucsd.edu> или на FTP-сервере по адресу: <ftp://lox.ucsd.edu/pub>.

Навигационные файлы находятся на том же сервере в директории <ftp://lox.ucsd.edu/pub/nav>.

Региональные сети GPS отличаются, как правило, высокой плотностью приемников GPS на территории сети и более высоким временным разрешением данных. В Японии региональная сеть GEONET [9] объединяет около 1000 приемников, поставляющих данные с шагом 30 и 1 с, но подавляющая часть этих данных недоступна для широкого использования.

Измерения с GPS-приемников поступают через центры оперативного сбора данных (Operational Data Centers) в региональные (Regional Data Centers) и затем в глобальные (Global Data Centers) центры хранения данных. Здесь предусмотрено дублирование на случай штатной или нештатной остановки сервера какого-либо из центров. Отсюда предоставляется доступ центрам обработки, а также общий публичный доступ.

Существуют 3 глобальных центра хранения данных:

1. Crystal Dynamics Data Information System, NASA GSFC, USA, код – CDDISA, адрес: www.cddisa.gsfc.nasa.gov.
2. Institut Geographique National, France, код IGN, адрес: <ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs>.
3. Scripps Institution of Oceanography, USA, код – SIO, адрес: www.sopac.ucsd.edu.

На сайте <ftp://igsb.jpl.nasa.gov/pub/center> для каждого центра обработки дана краткая справка по используемым программам, стратегии вычислений, моделям, структуре публикуемых данных, а для центров хранения данных - дерево каталогов ftp-сервера. Некоторые центры, например, SIO, предоставляют удобный WEB-интерфейс с большим количеством разнообразных сервисов: поиском данных по запросу, интерактивными картами и пр.

В России организован Информационно-аналитический центр (ИАЦ) Федерального космического агентства, где хранятся результаты анализа навигационной информации, а также различные типы измерительной и справочной информации из международных систем сбора и хранения данных [10].

Таким образом, имеется достаточное число Интернет-архивов с данными о характеристиках сигналов, получаемых от навигационных космических аппаратов, которые можно использовать для решения широкого круга научных и прикладных задач.

Программы обработки RINEX-файлов делятся на программы первичной обработки и вторичной (детальной) обработки. К программам первичной обработки относится программа TEQC. Она позволяет проводить про-

верку качества данных, получать данные за конкретные временные интервалы, производить архивирование, редактирование и ряд других функций. К программам вторичной обработки относятся программные комплексы GAMIT и GLOBDET. Программный пакет GAMIT разработан Массачусетским технологическим институтом. Его нет в открытом доступе. Однако для желающих есть возможность обработки с помощью этого продукта небольшого объема файлов Rinx-формата на сервере SOPAC.

Программный комплекс глобального детектирования и мониторинга ионосферных возмущений естественного и техногенного происхождения на основе измерений вариаций полного электронного содержания (GLOBDET) разработан в Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН (<http://ckm.iszf.irk.ru/>). Он, как и пакет GAMIT, позволяет производить расчет вариаций полного электронного содержания (ПЭС), моделировать изменения ПЭС и др.

При планировании обработки данных GPS НКА необходима информация о характеристиках созвездия GPS НКА, положение их орбит относительно выбранного пункта/территории наблюдения в заданные временные отрезки, характеристики модельной и наблюдаемой наземными радиотехническими средствами ионосферы, сведения о доступности архивных данных и их наличии, доступ в ИНТЕРНЕТ, если отсутствуют данные оперативных наблюдений с приемных станций. Кроме этого, необходима четкая постановка задачи на обработку данных и форму представления расчетов. При обработке данных GPS НКА необходима высокая пропускная способность каналов связи, программы дешифрирования RINEX-файлов, программы преобразования и представления полученных данных в требуемых форматах, программы анализа полученных графиков, полей, таблиц. Значительные трудозатраты на написание программ и их отладку обуславливают использование многими исследователями имеющихся программных продуктов для окончательной обработки и представления данных в нужном формате.

В качестве рекомендаций по разработке программ обработки архивных данных о характеристиках сигналов НКА как в системе ГЛОНАСС, так и в системе GPS, следует выделить необходимость разработки комплекса программ, позволяющих проводить:

- дешифрирование архивных данных о характеристиках сигналов НКА;
- анализ орбит НКА в зоне видимости выбранных станций;
- представление анализируемых данных в виде та-

блиц, графиков карт;

• анализ состояния ионосферы в выбранном секторе;

• анализ состояния ионосферы в магнитосопряженном районе;
• анализ карт ПЭС.

Литература

1. <http://www.gpssoft.ru/glonass.html>.

2. <http://npkintec.ru/?section=work&razdel=articles&id=9>.

3. Кирюшкин В.В., Афраймович Э.Л., Дисенов А.А., Использование спутниковых радионавигационных систем для регистрации ионосферных возмущений на больших удалениях от точки пуска ракет. Труды 4-й Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития». Томск, 31 октября – 3 ноября 2007 г.

4. Кирюшкин В.В., Афраймович Э.Л., Дисенов А.А. GPS-мониторинг ионосферных возмущений, генерируемых при старте ракет, на больших удалениях от места старта. Геомагнетизм и аэронавигация, 2008 Т. 48, № 3 с.365-380.

5. Андрианов В.А., Смирнов В.М. Определение высотного профиля электронной концентрации ионосферы Земли по двухчастотным измерениям радиосигналов искусственных спутников Земли. //Радиотехника и электроника, 1993, т.38. №7, с.1326-1337.

Гурвич А.С., Красильникова Т.Г. Об использовании навигационных спутников для радиопросвечивания атмосферы Земли. // Космические исследования. 1987. № 6. С. 89.

6. George A. Hajj1, Lou C. Lee, Xiaoping Pi1, Larry J. Romans1, William S. Schreiner, Paul R. Straus, Chunming Wang. COSMIC GPS Ionospheric Sensing and Space Weather. TAO, Vol. 11, No. 1, P. 235-272, March 2000.

7. Литеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992.

8. <http://www.iag-aig.org/>.

9. <http://mekiragsi.go.jp/>; <http://terrasgsi.go.jp/>.

10. <http://www.glonass-ianc.rsa.ru>.

Материал поступил в редакцию 10. 12. 2010 г.