

Разработка программного комплекса обработки DORIS-измерений в ИНАСАН

© С. П. Кузин, К. В. Эбауэр

ИНАСАН, г. Москва, Россия

Центр анализа DORIS-данных (фр. Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégré par Satellite) Института астрономии РАН (ИНАСАН) регулярно отправляет свои результаты анализа в Международную службу (IDS, International DORIS Service) системы DORIS в соответствии со стандартами и временной задержкой, определенными IDS. Измерения DORIS в формате doris2.2 обрабатываются в ИНАСАН с помощью программного пакета GIPSY-OASIS II, разработанного JPL (Jet Propulsion Laboratory, США). С момента запуска спутника JASON-2 в 2008 г., измерения системы DORIS появились в новом формате RINEX, который, согласно заявлению IDS, в ближайшем времени будет единственным форматом представления DORIS-данных. Так как текущая версия программы GIPSY-OASIS II не поддерживает обработку измерений формата RINEX, то в целях дальнейшего существования ИНАСАН как центра анализа IDS возникла необходимость разработки собственного программного пакета обработки DORIS-данных, представленных в формате RINEX. В статье приведены первые результаты обработки DORIS-данных, представленных в формате RINEX.

Ключевые слова: система DORIS, центр анализа IDS, программный комплекс обработки DORIS-данных, формат RINEX, результаты обработки.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.50.44-50>

Введение

Система DORIS и созданная на ее основе Служба IDS [1] являются одной из спутниковых технологий, вносящих свой вклад в построение Глобальной геодезической системы наблюдений (GGOS, Global Geodetic Observing System) и Международной земной системы координат (ITRF, International Terrestrial Reference System). В процессе эволюции системы DORIS, а именно с разработкой нового поколения приемников системы (называемых приемниками DGXX), появилась возможность выполнения новых видов измерений — фазовых и кодовых измерений. Данные виды измерений распространяются для пользователей в формате RINEX (Receiver Independent Exchange Format) [2]. Одним из преимуществ наблюдений в формате RINEX является их быстрая доступность для пользователей и возможность для центров анализа DORIS-данных самим вычислять ионосферную коррекцию распространения сигналов и осуществлять высокоточную временную привязку измерений. Данная возможность отсутствовала в измерениях системы DORIS, выраженных в предшествующем формате doris2.2 [2]. Появление измерений в формате RINEX требует значительного изменения существующего программного обеспечения, используя

емого ИНАСАН для обработки DORIS измерений (программа GIPSY-OASIS II) [3]. Ввиду трудности модернизации иностранного программного обеспечения, группа космической геодезии ИНАСАН решила разработать свой собственный программный комплекс для обработки RINEX-DORIS-измерений. В данной статье описывается методика, используемая при обработке RINEX-DORIS-измерений, и приводятся первые полученные результаты.

Обработка DORIS-RINEX-измерений

Методика обработки

Методика обработки DORIS-измерений, представленных в формате RINEX, приведена в работе [4]. Данная методика с незначительными изменениями реализована группой космической геодезии ИНАСАН. Алгоритм обработки RINEX-DORIS-измерений основан на подсчете числа циклов доплеровской частоты, излучаемой наземным передатчиком, и принимаемых бортовым приемником.

Для оценки орбит спутников, оснащенных DORIS-приемниками, были использованы следующие выражения:

$$\begin{cases} V_0 = \frac{c}{f_{eN}} (f_{eN} - f_{rT} - \frac{N_{dop}}{\Delta\tau_r}) + \Delta V_{iono} + \Delta V_{rel} \\ V_c = (1 - \frac{U_e}{c^2} - \frac{V_e^2}{2c^2}) \frac{\rho_2 - \rho_1}{\Delta\tau_r} + \Delta V_{тропо} - \frac{c(\frac{N_{dop}}{\Delta\tau_r} + f_{rT})}{f_{eN}}, \end{cases} \quad (1)$$

где:

— подстрочные индексы e и r обозначают передатчик и приемник соответственно;

— подстрочные индексы N и T обозначают номинальную и истинные частоты соответственно;

— V_0 – измеренная скорость передатчика относительно приемника на интервале $\Delta\tau_r$, полученная на основе подсчета числа циклов доплеровской частоты N_{dop} и скорректированная с учетом ионосферной ΔV_{iono} и релятивистских поправок ΔV_{rel} ;

— V_c – теоретическая (вычисленная) скорость передатчика относительно приемника на интервале $\Delta\tau_r$ и скорректированная с учетом тропосферной поправки $\Delta V_{тропо}$ и смещения частоты эмиттера $\frac{\Delta f_e}{f_{eN}}$;

— $f_{rT} = f_{rN} (1 + \frac{\Delta f_r}{f_{rN}})$ – оценка истинной частоты приемника;

— U_r и U_e – гравитационные потенциалы приемника и передатчика, соответственно;

— V_r и V_e – скорости приемника и передатчика, соответственно, в координированной системе отсчета;

— ΔV_{iono} – ионосферная коррекция измерений скорости передатчика относительно приемника;

- c – скорость света в вакууме;
- ΔV_{rel} – релятивистская коррекция измерений скорости передатчика относительно приемника;
- ρ_2 и ρ_1 – геометрические расстояния между передатчиком и приемником для двух последовательных моментов доплеровских измерений;

Программный комплекс обработки DORIS-RINEX-измерений

Для обработки DORIS-RINEX-измерений по вышеописанной методике был использован разработанный группой космической геодезии ИНАСАН программный комплекс обработки лазерных измерений искусственных спутников Земли [5]. Данный программный продукт позволяет обрабатывать измерения сферических геодезических искусственных спутников Земли как на низких орбитах, так и на средних. Комплекс включает в себя не только блок работы с лазерными измерениями, но и довольно универсальную программу для орбитальных вычислений с привлечением современных моделей учета возмущающих факторов:

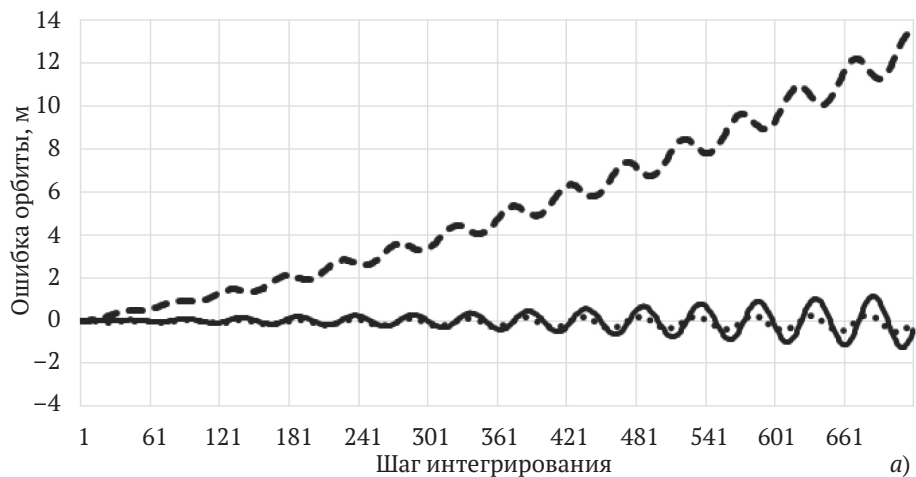
- любые модели гравитационного поля Земли (в том числе с включением периодических членов);
- твердотельные земные приливы;
- некоторые модели океанических приливов;
- полюсные приливы;
- атмосферные и океанические модели AOD1B;
- атмосферные приливы;
- световое давление и альbedo Земли;
- атмосферное торможение.

Указанный в работе [5] программный комплекс был доработан для получения возможности обрабатывать DORIS-RINEX-измерения. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

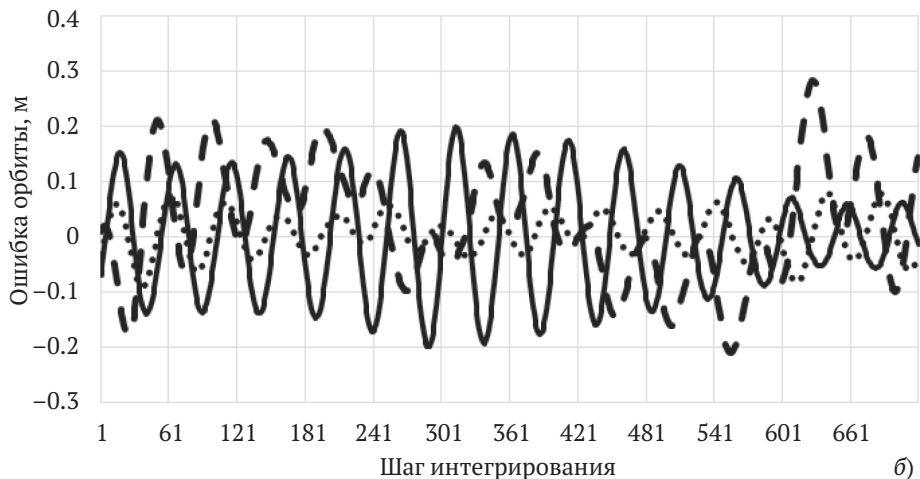
- реализована возможность работы с входными данными DORIS в требуемом формате и орбитами в формате sp3;
- реализована обработка больших объемов данных (количество наблюдений нередко превосходит 100 000 на суточном интервале);
- реализован алгоритм вычисления свободных членов по соответствующей модели наблюдений;
- модифицирован алгоритм учета неконсервативных сил в зависимости от сложной геометрии спутников и их ориентации в пространстве;
- реализована работа с кватернионами для спутников JASON-2/3;
- осуществлен учет фазовых центров антенн для передатчиков и приемников;
- проведено уточнение сдвигов частоты на каждом проходе;
- реализовано уточнение тропосферных задержек распространения сигналов;
- осуществлен учет маневров спутников;
- некоторые другие доработки, которые привели к существенному изменению уже имеющегося программного комплекса.

Результаты обработки

На первом этапе проверки разработанного программного модуля обработки DORIS-RINEX-измерений была протестирована программа интегрирования орбит с учетом доработанных модулей учета атмосферного торможения и светового давления. В качестве исходных данных использовались файлы орбит французского космического агентства CNES (фр. Centre National d'Études Spatiales) GDR-E standard [6] в формате sp3. Интервал обработки составлял 1 день. На рис. 1 приведены суточные разницы орбит, оцененных с помощью разработанного программного комплекса, и орбит, полученных центром анализа CNES для спутника CRYOSAT2 в продольном, поперечном и радиальных направлениях движения спутника.



Движение спутника: радиальное - - - продольное — поперечное



Движение спутника: радиальное - - - продольное — поперечное

Рис. 1. Разница оценок суточных орбит, полученных в ИНАСАН, и опорных орбит центра анализа CNES для спутника CRYOSAT2;

а — результаты первой итерации, б — результаты последней итерации

Из графиков, приведенных на рис. 1, видно, что процесс оценки орбит спутника CRYOSAT2 выполняется корректно, но все же имеются разности порядка 20 см по сравнению с орбитой центра анализа CNES. Более того, эти различия имеют сугубо периодический характер, что обуславливает необходимость усовершенствования моделирования действующих на спутник внешних воздействий. Кроме того, необходимо провести дополнительные исследования для нахождения наиболее точных параметров орбит для каждого спутника (число оцениваемых коэффициентов торможения вследствие влияния атмосферы, эмпирических ускорений, более совершенных моделей альbedo Земли и непрямого воздействия солнечной радиации). Следует отметить, что примерно такой же вид имеют графики оценки орбит для других спутников системы DORIS.

Следующий этап обработки связан с получением орбитальных решений на длительных интервалах обработки. На рис. 2 приведен график остаточных суточных погрешностей измерения радиальной скорости передатчиков относительно спутников для шести DORIS-миссий (CRYOSAT2, JASON-2, JASON-3, HY2A, SARAL, SENTINEL3-A). Интервал обработки – 6 месяцев 2017 г. (дни 1–181).

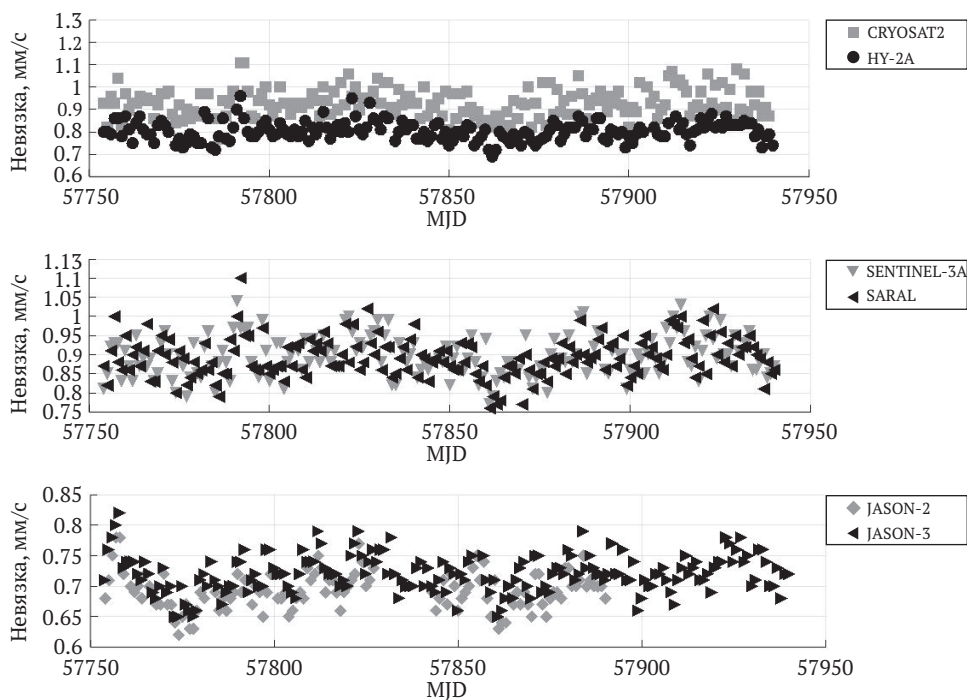


Рис. 2. Остаточные суточные погрешности радиальной скорости передатчиков относительно приемников для шести DORIS-миссий

В таблице показаны сравнительные характеристики средних остаточных погрешностей радиальной скорости передатчиков относительно приемников для шести спутников системы DORIS, полученных программой GIPSY-OASIS II и программным комплексом, разработанным в ИНАСАН. Интервал обработки – 6 месяцев 2017 г. (дни 1–181).

Средние остаточные погрешности радиальной скорости передатчиков относительно приемников для спутников системы DORIS

Спутник	Остаточные погрешности радиальной скорости, мм/с	
	Gipsy-Oasis II	Программный комплекс ИНАСАН
CRYOSAT2	$0.49 \pm 2.96e-06$	0.93 ± 0.06
HY2A	$0.44 \pm 1.19e-06$	0.80 ± 0.04
JASON-2	$0.42 \pm 2.58e-06$	0.70 ± 0.03
JASON-3	—	0.70 ± 0.03
SARAL	$0.44 \pm 1.59e-06$	0.89 ± 0.05
SENTINEL-3A	—	0.90 ± 0.05

Как видно из таблицы, остаточные погрешности радиальной скорости, полученные с помощью собственного программного пакета ИНАСАН, находятся на приемлемом уровне, но примерно в 2 раза хуже по сравнению с другими центрами анализа IDS, что показывает необходимость дальнейшей доработки программного пакета ИНАСАН.

Заключение

Результаты, полученные с помощью программного комплекса, разработанного в ИНАСАН, показывают достаточно удовлетворительные оценки радиальной скорости передатчиков относительно спутниковых приемников, сравнимые с результатами программы Gipsy-Oasis II.

Немного завышенные оценки остаточных погрешностей радиальной скорости программного комплекса ИНАСАН по сравнению с результатами программы Gipsy-Oasis II показывают необходимость доработки программного комплекса ИНАСАН.

Для повышения точности полученных результатов намечены дальнейшие пути усовершенствования программного комплекса ИНАСАН. В частности, предполагается улучшить модели неконсервативных сил, действующих на спутник, реализовать априорные модели attitude для спутников JASON-2,3, оценить тропосферную задержку распространения сигнала для станций.

Л и т е р а т у р а

1. Willis P., Fagard H., Ferrage P., Lemoine F. G., Noll C. E., Noomen R., Otten M., Ries J. C., Rothacher M., Soudarin L., Tavernier G., Valette J. J. The International DORIS Service (IDS): Toward maturity // *Advances In Space Research*. — 2010. — Vol. 45, no. 12. — P. 1408–1420.
2. International DORIS Service [Homepage]. — URL: <https://ids-doris.org/ids/data-products/data-structure-and-formats.html> (accessed: 15.04.2019).
3. Kuzin S., Tatevian S. DORIS data processing in the INASAN Analysis Center and the contribution to ITRF2014 // *Advances in Space Research*. — 2016. — Vol. 58, no. 12. — P. 2561–2571.

4. Lemoine J. M., Capdeville H., Soudarin L. Precise orbit determination and station position estimation using DORIS RINEX data // *Advances In Space Research*. — 2016. — Vol. 58, no. 12. — P. 2677–2690.

5. Ebauer K. V. Development of a software package for determination of geodynamic parameters from combined processing of SLR data from LAGEOS and LEO // *Geodesy and Geodynamics*. — 2017. — Vol. 8, no. 3. — P. 213–220.

6. URL: ftp://cddis.nasa.gov/doris/products/orbits/ssa/README_SP3.txt (accessed: 15.04.2019).

Development of the DORIS Data Processing Software in the INASAN

S. P. Kuzin, K. V. Ebauer

The DORIS (Doppler Orbitography and Radio positioning Integrated by Satellite) Data Analysis Center of the Institute of Astronomy RAS (INASAN) supplies its products to the International DORIS Service (IDS) on the regular basis in compliance with the IDS defined standards and time delay. Currently, the DORIS measurements in the doris2.2 format are processed in the INASAN using the GIPSY-OASIS II software developed by the JPL (USA). Since the launch of the JASON-2 satellite (2008), the DORIS measurements have been introduced in the new RINEX format, which, according to the IDS, will remain the only DORIS data format in the near future. The current version of the GIPSY-OASIS II program does not support the processing of measurements in the RINEX format, therefore it became necessary for the INASAN to develop its own software for the DORIS data processing in the RINEX format in order to continue its existence as the center of the IDS analysis. The article presents our first results of the RINEX DORIS data processing.

Keywords: DORIS system, IDS analysis center, DORIS data processing software, RINEX format, processing results.