

УДК 527.62:519.21

**СТОХАСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФЕМЕРИД НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ
НА ВОЗМУЩЕННЫХ ОРБИТАХ*****С. В. СОКОЛОВ, В. В. КАМЕНСКИЙ, С. М. КОВАЛЕВ***Ростовский государственный университет путей сообщения,
Россия, Ростов-на-Дону, 344038, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2*

Аннотация. Одним из основных факторов, определяющих точность спутниковой навигации, являются ошибки эфемерид навигационных спутников. Для повышения точности определения эфемерид современные спутники оснащаются аппаратурой межспутниковых измерений, но при этом в тракте приема–передачи данных измерений неизбежно присутствуют случайные помехи, влияние которых необходимо минимизировать. С этой целью стохастическую оценку эфемерид навигационных спутников, движущихся по возмущенным орбитам, предлагается осуществлять в виде процедуры параметрической оптимизации на основе минимизации аддитивной совокупности двух функционалов, оптимизация первого из которых обеспечивает минимум неопределенности оценки эфемерид, а минимизация второго — минимум нормы вектора вариаций параметров орбит на текущем интервале времени. Для иллюстрации эффективности предложенного подхода проведено численное моделирование оценки эфемерид спутниковой группировки при соответствующих траекторных возмущениях. Результаты моделирования иллюстрируют возможность определения эфемерид навигационных спутников на основе рассмотренного подхода, использующего зашумленные межспутниковые измерения, с точностью до единиц метров.

Ключевые слова: навигационные параметры; возмущенные ортодромические орбиты; погрешности межспутниковых измерений; стохастическая оценка эфемерид

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных факторов, определяющих точность спутниковой навигации, являются ошибки определения текущих эфемерид навигационных спутников, которые могут достигать на небольших интервалах времени значительных величин [1–3]. Например за счет влияния гравитации Луны и Солнца и второй зональной гармоники суммарная ошибка в течение часа может вырасти до 300–400 м.

Для уменьшения этих ошибок в навигационных системах ГЛОНАСС и GPS в настоящее время осуществляется аппаратно-программная модернизация на основе размещения на борту спутника измерительных средств [4]. Спутники ГЛОНАСС-М оснащаются бортовой аппаратурой межспутниковых измерений [5, 6], спутники ГЛОНАСС-К — приемо-формирующими устройствами межспутниковых радиолиний [6–8] и т.п. В целом, использование межспутниковых измерений, позволяю-

* Работа поддержана грантами РФФИ № 18-07-00126, 16-07-00032. Результаты работы использованы при выполнении гос. задания № 1.11772.2018/11.12.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Перов, А.И.; Харисов, В.Н.; и др. *ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования*. Под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. 4-е изд. М.: Радиотехника, 2010. 800 с. URL: <http://www.radiotec.ru/book/137>.
2. Fateev, A.; Vassilyev, A.; Somov, S. "Attitude guidance and control of the navigation satellites at passage of singular orbit sites," *AIP Conf. Proc.*, Vol. 1798, No. 1, P. 020149, 2017. DOI: [10.1063/1.4972741](https://doi.org/10.1063/1.4972741).
3. Акимов, Е.В.; Козорез, Д.А.; Красильщиков, М.Н.; Кружков, Д.М. "Повышение автономности функционирования космических систем связи и навигации на основе использования информационных ГНСС-технологий," *Вестник компьютерных и информационных технологий*, № 8, С. 9–18, 2017. DOI: [10.14489/vkit.2017.08.pp.009-018](https://doi.org/10.14489/vkit.2017.08.pp.009-018).
4. Kuznetsov, V. I.; Danilova, T. V. "Multifunctional astronomical self-organizing system of autonomous navigation and orientation for artificial Earth satellites," *Cosmic Research*, Vol. 55, No. 2, P. 142-158, 2017. DOI: [10.1134/S0010952517020046](https://doi.org/10.1134/S0010952517020046).
5. Ступак, Г.Г.; Ревнивых, С.Г.; Игнатович, Е.И.; Куршин, В.В.; Бетанов, В.В.; Панов, С.С.; Бондарев, Н.З.; Чеботарев, В.Е.; Балашова, Н.Н.; Сердюков, А.И.; Синцова, Л.Н. "Выбор структуры орбитальной группировки перспективной системы ГЛОНАСС," *Исследования наукограда*, Т. 6, № 3–4, С. 4–11, 2013. URL: http://www.journal-niss.ru/archive_view.php?num=44.
6. Шаргородский, В.Д.; Косенко, В.Е.; Садовников, М.А.; Чубыкин, А.А.; Мокляк, В.И. "Роль лазерных средств в обеспечении точности системы ГЛОНАСС," *Исследования наукограда*, Т. 6, № 3–4, С. 17–23, 2013. URL: http://www.journal-niss.ru/archive_view.php?num=47.
7. Hryshchuk, R.; Zavada, A. "Earth remote sensing satellite navigation based on optical trajectory measurements," *Recent Advances in Systems, Control and Information Technology*, SCIT 2016. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol 543. Springer, Cham, 2017. DOI: [10.1007/978-3-319-48923-0_54](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48923-0_54).
8. Кисленко, К.В.; Суевалов, В.В. "Технология высокоточного определения параметров относительного движения космических аппаратов по данным аппаратуры спутниковой навигации ГЛОНАСС," *Космонавтика и ракетостроение*, № 4, С. 158–163, 2017.
9. Tuttle, R. "Next-gen GPS navigation satellites must keep improving to keep u.s. ahead of attempts at jamming," *Aviation Week & Space Technology*, Vol. 158, No. 20, P. 46, 2003.
10. Yudanin, A. Ya.; Mogilnitskii, B. S.; Tolstikov, A. S. "Improvement in the orbital parameters of GLONASS navigation satellites based on non-interrogatory measurements of pseudodistances," *Meas. Tech.*, Vol. 52, No. 12, P. 1256-1262, 2009. DOI: [10.1007/s11018-010-9430-0](https://doi.org/10.1007/s11018-010-9430-0).
11. Bogdanov, O. N. "Refinement of trajectory parameters for GPS and GLONASS navigation satellites using IGS position data," *Moscow University Mechanics Bulletin*, Vol. 64, No. 3, P. 61-63, 2009. DOI: [10.3103/S0027133009030029](https://doi.org/10.3103/S0027133009030029).
12. Qian, Y. J.; Jing, W. X.; Gao, C. S. "Autonomous navigation method for multi-satellites mission," *Harbin Gongye Daxue Xuebao*, Vol. 42, No. 5, P. 705-709, 2010.
13. Dugin, N. A.; Nechaeva, M. B.; Antipenko, A. A.; Dement'ev, A. F.; Tikhomirov, Yu. V. "Measurement of antenna parameters by signals from space satellites of the glonass and navstar navigation systems," *Radiophys. Quantum Electronics*, Vol. 54, No. 3, P. 159-165, 2011. DOI: [10.1007/s11141-011-9278-4](https://doi.org/10.1007/s11141-011-9278-4).
14. Соколов, С.В.; Ковалев, С.М.; Каменский, В.В.; Кучеренко, П.А. "Стохастическая фильтрация данных межспутниковых измерений на ортодромических траекториях," *Известия ВУЗ. Приборостроение*, Т. 59, № 4, С. 275–281, 2016. DOI: [10.17586/0021-3454-2016-59-4-275-281](https://doi.org/10.17586/0021-3454-2016-59-4-275-281).
15. Соколов, С.В. "Синтез аналитических моделей пространственных траекторий и их применение для решения задач спутниковой навигации," *Прикладная физика и математика*, Т. 1, № 2, С. 3–12, 2013. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22739669>.
16. Соколов, С.В. "Аналитические модели пространственных траекторий для решения задач навигации," *Прикладная математика и механика*, Т. 79, № 1, С. 24–30, 2015. URL: <http://pmm.ipmnet.ru/ru/Issues.php?y=2015&n=1&p=24>.
17. Чернов, А.А.; Ястребов, В.Д. "Метод оценки возмущений в алгоритмах решения навигационных задач," *Изв. РАН. Космические исследования*, Т. 22, № 3, 1984.
18. Тихонов, В.И.; Харисов, В.Н. *Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем*. М.: Радио и связь, 1991. 608 с.

Поступила в редакцию 07.12.2017

После переработки 03.07.2018