

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ОРБИТ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ ГЛОНАСС

С. Д. Петров, Е. В. Калачева, С. С. Смирнов

Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9

Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС сегодня находит широкое применение во многих областях науки и техники. Как и ее американский аналог, Global Positioning System (GPS), она играет важную роль в определении параметров ориентации Земли (ПОЗ). При этом, как известно, ПОЗ уверенно определяются по наблюдениям навигационных спутников обеих систем лишь в диапазоне частот от примерно одного цикла в год до одного цикла в сутки. ПОЗ на интервалах более года определяются с низкой точностью в виду относительно низкой стабильности орбит навигационных спутников. В то же время, оценки ПОЗ внутри суток получаются нереалистичными вследствие, по-видимому, корреляций между ПОЗ и элементами орбит спутников. Данная проблема может быть решена путем построения аналитической теории движения навигационных спутников. Причем для этого спутники ГЛОНАСС имеют преимущество перед спутниками GPS, заключающееся в том, что корректировка их движения производится значительно реже, чем в случае спутников GPS. В настоящей работе рассчитываются спектры мощности орбитальных параметров спутников ГЛОНАСС с целью построения в дальнейшем аналитической теории их движения. Параметры орбит спутников оцениваются по точным эфемеридам Международной ГНСС-службы. Спектры мощности параметров орбит оцениваются методом максимума энтропии. Библиогр. 3 назв. Ил. 5.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, аналитическая небесная механика, навигационные спутники, метод максимума энтропии.

Введение. Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), такие как Глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС) и ее американский аналог GLOBAL POSITIONING SYSTEM (GPS), сегодня широко применяются в различных областях науки и техники. В астрономии ГНСС играют важную роль в определении параметров ориентации Земли (ПОЗ), а также земной системы отсчета. На сегодняшний день точность определения ПОЗ и координат пунктов посредством наблюдений радиосигналов навигационных спутников ГНСС определяется лишь точностью положений спутников в пространстве. Все остальные факторы, влияющие на точность ГНСС-позиционирования, такие как тропосферная и ионосферная задержки, поправки бортовых часов, в настоящее время уверенно оцениваются непосредственно из ГНСС-наблюдений, производимых на сетях станций. Так, тропосферная задержка навигационного сигнала из ГНСС-наблюдений определяется значительно точнее, чем по метеоданным.

Таким образом, на сегодняшний день основную трудность представляют собой высокоточные определения положений спутников или параметров их орбит. Временные ряды положений навигационных спутников, также известные как их эфемериды, формируются двумя способами, аналитическим и численным. Аналитический способ заключается в построении аналитической теории движения навигационного спутника, содержащей небольшое количество параметров, оцениваемых непосредственно из наблюдений. Численный способ заключается в построении эфемериды спутника посредством численного интегрирования уравнений его движения на некотором конечном интервале времени с оцениванием начальных и/или краевых условий непосредственно из наблюдений.

Аналитические методы эфемеридного обеспечения получили широкое развитие в работах классиков небесной механики, начиная от Эйлера и Лагранжа вплоть до работ Депри, Хори и многих других. За триста лет накоплен замечательный арсенал аналитических методов небесной механики, в частности применимых к задаче эфемеридного обеспечения систем ГНСС. В качестве нулевого приближения находится решение задачи двух тел (Земля — спутник) в виде шести постоянных интегрирования — кеплеровых орбитальных элементов. Затем методом последовательных приближений решается «возмущенная» задача двух тел, в которой орбитальные элементы находятся как функции времени под воздействием возмущающих ускорений спутника. Недостатком аналитических методов считается их «громоздкость», выражающаяся в огромных количествах сложных аналитических выражений для коэффициентов разложений орбитальных элементов в ряды по малым параметрам. Именно по этой причине, по-видимому, аналитические методы эфемеридного обеспечения сегодня практически не применяются в системах ГНСС.

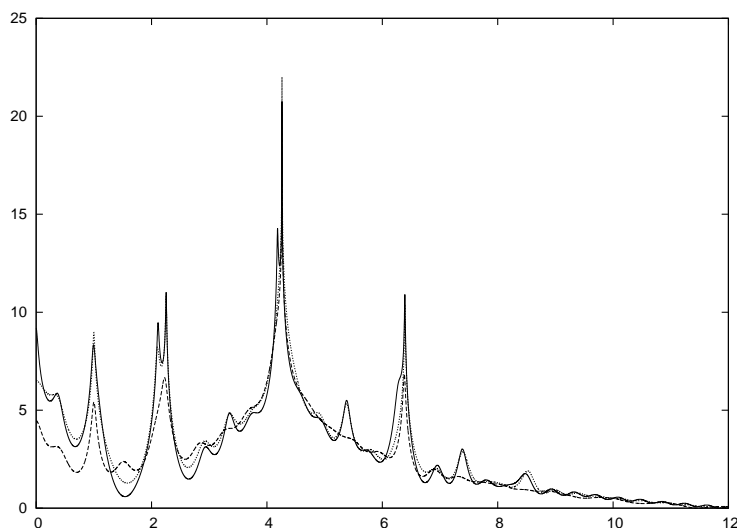


Рис. 1. Спектр мощности большой полуоси для трех спутников ГЛОНАСС в децибелах. Частота по оси абсцисс в циклах за средние солнечные сутки.

Численные методы эфемеридного обеспечения как правило применяются не к орбитальным элементам, а непосредственно к пространственным координатам спутников. Координаты на начальный момент времени определяются из наблюдений. Далее координаты представляются в виде простых, как правило, полиномиальных функций времени на некотором коротком временном интервале, а будущие значения координат вычисляются последовательно из дифференциальных уравнений движения в виде разностных схем. Основным недостатком численных методов является необходимость нахождения начальных или краевых условий интегрирования непосредственно из наблюдений. На практике начальные или краевые координаты определяются из наблюдений по меньшей мере раз с сутки или чаще. При этом координаты спутника оцениваются из наблюдений совместно с параметрами ориентации Земли. Из очевидных геометрических соображений следует, что положения спутника на орбите коррелируют с параметрами ориентации Земли. Так, долгота подспутниковой точки полностью коррелирует со Всемирным временем, поскольку любой поворот орбиты вокруг оси мира можно полностью компенсировать поворотом Земли и наоборот. С другой

Рис. 2. Спектр мощности эксцентриситета для трех спутников ГЛОНАСС в децибелах. Частота по оси абсцисс в циклах за средние солнечные сутки.

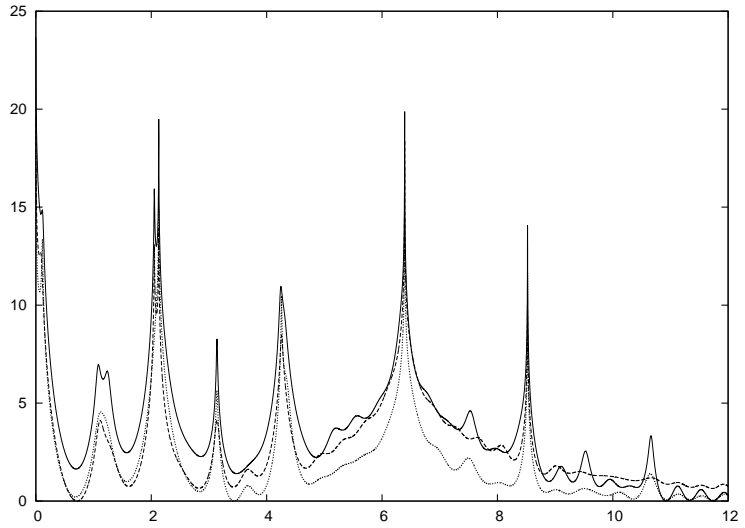
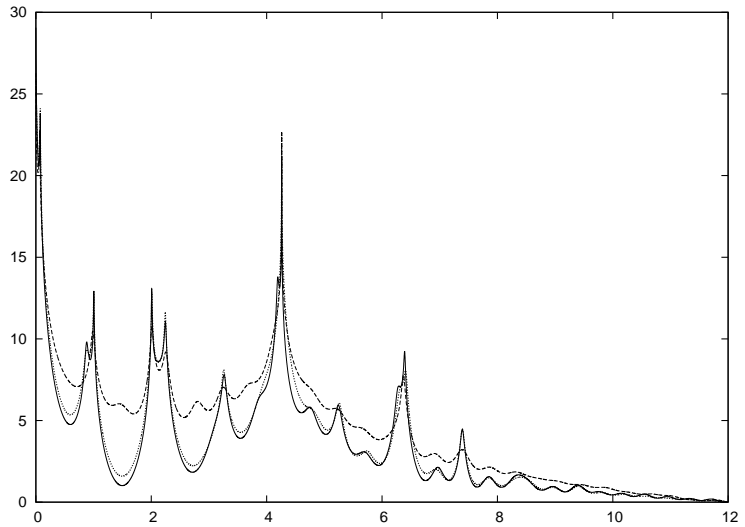


Рис. 3. Спектр мощности наклона для трех спутников ГЛОНАСС в децибелах. Частота по оси абсцисс в циклах за средние солнечные сутки.



стороны, в современном эфемеридном обеспечении ГНСС применяются почти исключительно численные методы. На практике это приводит, например, к невозможности определения ПОЗ из ГНСС-наблюдений с внутрисуточным временным разрешением. По-видимому, эта проблема принципиально неразрешима в рамках численных методов эфемеридного обеспечения.

В следующем разделе рассматривается возможность построения аналитической теории движения навигационного ИСЗ, которая, с одной стороны, позволит решить проблему внутрисуточного определения ПОЗ, а с другой — позволит ограничить громоздкие аналитические выражения элементов орбит, исходя их простых практических соображений.

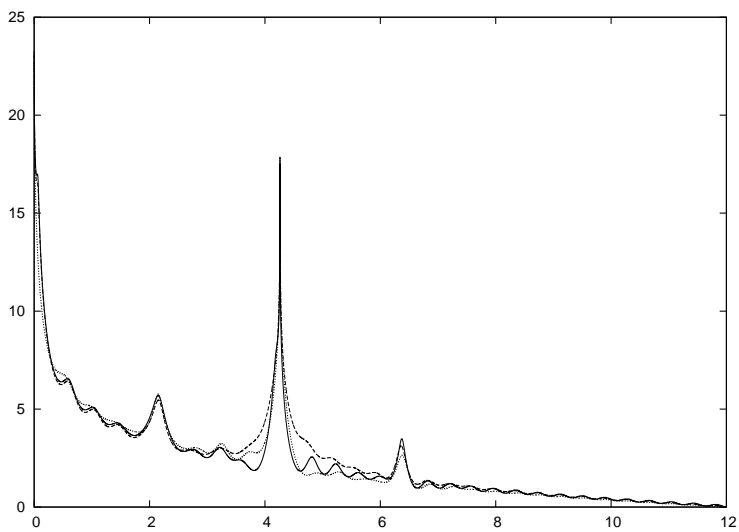


Рис. 4. Спектр мощности долготы восходящего узла для трех спутников ГЛОНАСС в децибелах. Частота по оси абсцисс в циклах за средние солнечные сутки.

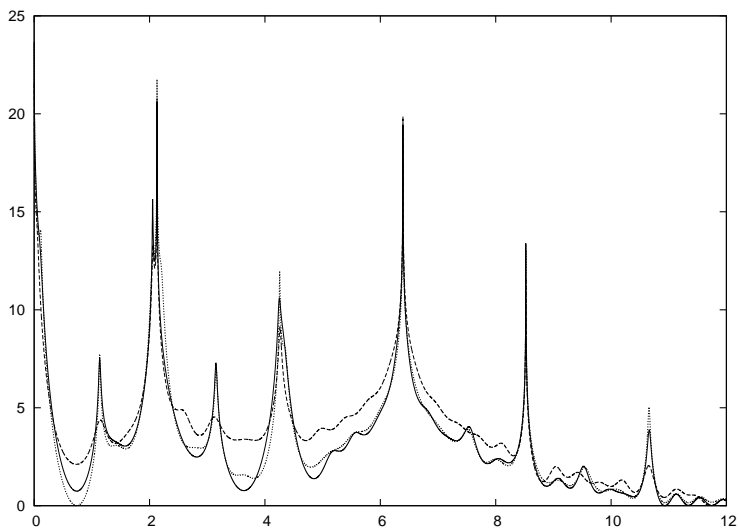


Рис. 5. Спектр мощности аргумента перигея для трех спутников ГЛОНАСС в децибелах. Частота по оси абсцисс в циклах за средние солнечные сутки.

Аналитическая теория движения навигационных спутников. Как следует из вышеизложенного, общим в аналитическом и численном подходах является представление координат спутника или его орбитальных элементов в виде аналитически заданной функции на некотором временном интервале. При этом в аналитическом способе стараются выбрать интервал как можно больше, а функция с ростом интервала получается соответственно все более громоздкой. В численном методе, напротив, функцию стараются выбрать как можно более простой, но временной интервал при этом с необходимостью получается коротким.

В настоящей работе предлагается найти компромиссное решение в выборе функции и интервала приближения, исходя из конкретные практические требований к оцениванию ПОЗ из ГНСС-наблюдений. Во-первых, очевидно, что аналитическое

представление орбит навигационных спутников на длительных, более года, интервалах времени заведомо бессмысленно, по крайней мере в обозримом будущем. Дело в том, что стабильность орбит ИСЗ определяется множеством факторов, учесть которые с требуемой точностью не представляется возможным. С другой стороны, интервал представления должен заведомо превышать сутки с тем, чтобы избежать корреляций ПОЗ с положениями спутников.

Таким образом, главной задачей настоящей работы является выбор оптимального интервала представления аналитических эфемерид спутников ГЛОНАСС с тем, чтобы, с одной стороны, максимально упростить выражения для орбитальных элементов, а с другой — избежать корреляций между начальными положениями спутника и параметрами ориентации Земли. С этой целью был выполнен спектральный анализ орбитальных элементов спутников ГЛОНАСС (см. рис. 1–5).

Спектральный анализ орбитальных элементов спутников ГЛОНАСС.

В настоящее время доступны два источника эфемерид навигационных спутников. Во-первых, это бортовые эфемериды, которые передаются непосредственно в навигационных радиосигналах, а во-вторых, это эфемериды Международной службы ГНСС, International GNSS Service (IGS). В первом случае эфемериды рассчитываются и прогнозируются Центром контроля и управления ГЛОНАСС в результате лазерной локации навигационных спутников. Во втором случае эфемериды рассчитываются независимой международной службой в результате обработки радионаблюдений ГНСС, производимых на глобальной сети станций. Точность бортовых эфемерид на сегодня составляет 1–3 м, точность финальных IGS-эфемерид достигает 3–7 см. Такое различие в точности обусловлено главным образом тем, что бортовые эфемериды получаются посредством прогноза, а финальные IGS-эфемериды вычисляются из реальных наблюдений. Кроме того, в случае IGS-эфемерид используется большой массив наблюдений практически со всей поверхности суши. В виду более высокой точности в данной работе используются IGS-эфемериды.

IGS-эфемериды спутников ГЛОНАСС даются в виде временных рядов прямоугольных координат спутников ГЛОНАСС в земной системе координат на каждые пятнадцать минут Всемирного координированного времени. Сначала эти координаты необходимо преобразовать в небесную систему. С этой целью используется стандартная процедура, рекомендованная Международной службой вращения Земли и систем координат, International Earth rotation and Reference systems Service (IERS). Далее рассчитываются оскулирующие орбитальные элементы методом Гаусса по двум положениям. В результате получаются временные ряды шести кеплеровых элементов орбит спутника ГЛОНАСС на каждые пятнадцать минут Всемирного координированного времени.

Для расчета спектров мощности орбитальных элементов применялся метод максимума энтропии. Спектральная плотность мощности для каждого спутника и каждого элемента нормировалась к своему максимальному значению и пересчитывалась в децибелах.

Заключение. Анализ графиков спектров мощности орбитальных элементов, выполненный для трех спутников ГЛОНАСС, позволяет сделать выбор интервала приближения аналитической теории движения навигационных спутников. Из графиков видно, что мощность вариации орбитальных элементов сосредоточена в двух частотных диапазонах, близгодовом и близсуточном. В соответствии с приведенными выше соображениями, построение аналитической теории движения в близгодовом частотном интервале не имеет практического смысла. С другой стороны, из графиков видно,

что на частотах от цикла в год до цикла в сутки спектральная плотность мощности пренебрежимо мала. Таким образом, искомый оптимальный интервал приближения для аналитической теории движения спутников ГЛОНАСС может быть выбран равным средним солнечным суткам. Такой выбор интервала позволит значительно упростить аналитические выражения для орбитальных элементов. Так, учет лунно-солнечных возмущений движения навигационных ИСЗ необходим лишь для близсучточного частотного интервала.

Литература

1. Глобальная навигационная спутникова система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Редакция 5.1. М.: РНИИКП, 2008.
2. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
3. Марпл С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 с.

Статья поступила в редакцию 25 декабря 2014 г.

Сведения об авторах

Петров Сергей Дмитриевич — кандидат физико-математических наук, доцент; serge.petrov@gmail.com

Калачева Екатерина Викторовна — аспирант; saikka@mail.ru

Смирнов Сергей Сергеевич — младший научный сотрудник; microsoft-suxx@mail.ru

SPECTRAL ANALYSIS OF GLONASS NAVIGATION SATELLITES ORBITAL PARAMETERS

Sergey D. Petrov, Ekaterina V. Kalacheva, Sergey S. Smirnov

St.Petersburg State University, Universitetskaya nab., 7-9, St.Petersburg, 199034, Russian Federation; serge.petrov@gmail.com, saikka@mail.ru, microsoft-suxx@mail.ru

Global navigation satellite system GLONAS is widely used nowadays in many fields of science and technology. As its american analogue, Global Positioning System (GPS) it plays an important role in estimation of Earth Orientation Parameters (EOP). As it is known, EOP are confidently estimated from navigation satellites observations only for frequencies from approximately one cycle per year to one cycle per day. EOP on intervals longer than one year are estimated with lower accuracy due to relatively low stability of navigation satellites orbits. At the same time, subdiurnal EOP appear to be unrealistic, most probably due to correlations between EOP and satellite orbital elements. This problem may be solved by construction of an analytical motion theory of navigation satellites. In this respect GLONASS has an advantage over GPS in the fact that motion of the former is corrected far more rarely than that of the latter. In this paper power spectra of GLONASS satellites are computed. Orbital elements are estimated from precise ephemerides of the International GNSS Service. Power spectra of the orbital elements are then estimated by the maximum entropy method. Refs 3. Figs 5.

Keywords: GLONASS, analytical celestial mechanics, navigation satellites, maximum entropy method.

References

1. *Global navigation satellite system GLONASS. Interface control document. Edition 5.1.* (Moscow, RNIИКП. 2008) [in Russian].
2. *GLONASS. Principles of construction and functioning* (ed. by A. I. Perov, V. N. Harisov, Moscow, Radiotekhnika, 2010) [in Russian].
3. Marple S. L. *Digital spectral analysis with applications* (Moscow, Mir. 1990) [in Russian].