

# ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ РАСЧЁТА ЭФЕМЕРИД СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС НА ТЕКУЩИЙ МОМЕНТ ВРЕМЕНИ

Конин В.В., Миронов К.О.

Національний Авіаційний Університет, інститут аеронавігації  
03058, Київ, пр. Космонавта Комарова 1, кафедра аеронавігаційних систем  
тел. +38(044)4067244; Email: \_Kirilka\_@ukr.net; тел. +38(050)3846637;

Documents ICAO, GLONASS ICD different editions, profile literature there is no definitive answer regarding the calculation of ephemeris of satellites in the current time. The need arises inference unambiguous formulas describing the physical meaning of a mathematical and statistical analysis. Since the GLONASS ephemeris pass in increments once in fifteen minutes, in between taking ephemeris consumer navigation equipment by means of mathematical models should receive ephemeris, based on data transmitted from the satellite before, this process is called - propagation of ephemerides. The novelty of the results is that a complete withdrawal supplemented and refined the formula for the propagation of ephemerides GLONASS, a comparison of data obtained by mathematical modelling with experimental data, conclusions about the feasibility of the formulas derived.

Проведение данной работы (рисунок 1) связано с тем, что в официальных документах ICAO и интерфейсно контрольных документах (ИКД) ГЛОНАСС разных редакций, другой профильной литературе [4,5,6] отсутствует однозначный ответ относительно расчета эфемерид спутников на текущий момент времени. Возникает потребность в выведении однозначных формул, описании физического смысла, проведении математического и статистического анализа. Определение координат потребителя существенно зависит от точности эфемерид спутников, которые в свою очередь передаются потребителям с дискретностью один раз в пятнадцать минут. В промежутках между приемом эфемерид со спутников навигационная аппаратура потребителя посредством математических моделей должна получать эфемериды на основе переданных данных со спутника ранее, такой процесс называется - размножение эфемерид. Увеличение точности данных, относительно размножения эфемерид ГЛОНАСС возможно вследствие выведения и уточнения существующей математической базы. Новизна полученных результатов исследования заключается в том, что получено полное выведение, дополнены и уточнены конечные формулы для размножения эфемерид ГЛОНАСС, проведено сравнение данных полученных в результате математического моделирования с экспериментальными, сделаны выводы о целесообразности применения выведенных формул.

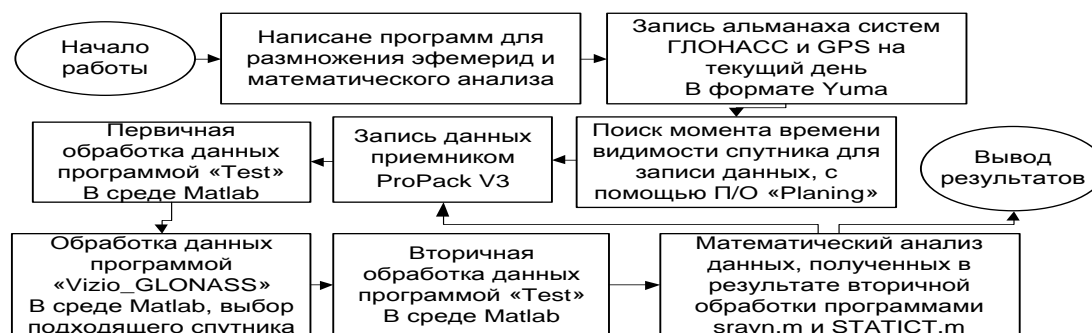


Рис. 1. Блок-схема выполнения работ по эксперименту

Используя фундаментальные формулы небесной механики нами было выведено пять математических формул для расчета эфемерид ГЛОНАСС на текущий момент времени. Алгоритм, который в нашей программе имеет первый номер, соответствует полному алгоритму из ИКД ГЛОНАСС редакции 5.1, расчет в данном алгоритме ведется по формуле 1. Второй алгоритм – повторяет первый, с той разницей, что используемые в

нем лунно-солнечные ускорения получены со спутника, тогда как в первом они рассчитаны нами.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial x}{\partial t} = V_x \\ \frac{\partial y}{\partial t} = V_y \\ \frac{\partial z}{\partial t} = V_z \\ \frac{\partial V}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial x} = -\frac{GM}{r^3} x + \frac{3}{2} \frac{GMa_e^2 J_2}{r^5} x \left( 1 - 5 \frac{z^2}{r^2} \right) + j_{x_0s} + j_{x_0m} \\ \frac{\partial V}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial y} = -\frac{GM}{r^3} y + \frac{3}{2} \frac{GMa_e^2 J_2}{r^5} y \left( 1 - 5 \frac{z^2}{r^2} \right) + j_{x_0s} + j_{x_0m} \\ \frac{\partial V}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial z} = -\frac{GM}{r^3} z + \frac{3}{2} \frac{GMa_e^2 J_2}{r^5} z \left( 1 - 5 \frac{z^2}{r^2} \right) + j_{x_0s} + j_{x_0m} \end{array} \right. , \quad (1)$$

В третьем использованы формулы упрощенного алгоритма из того же ИКД, но с учетом того, что перед элементом  $2\omega_E \cdot Vx$  стоит знак минус, а также с учетом того, что в скобках в элементе  $\left( 3 - 5 \frac{z^2}{r^2} \right)$  стоит 3 – в результате получаем:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x} = \frac{\partial x}{\partial t} = V_x \\ \dot{y} = \frac{\partial y}{\partial t} = V_y \\ \dot{z} = \frac{\partial z}{\partial t} = V_z \\ \frac{\partial V}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial x} = -\frac{GM}{r^3} x + \frac{3}{2} \frac{GMa_e^2 J_2}{r^5} x \left( 1 - 5 \frac{z^2}{r^2} \right) + \omega_E^2 \cdot x + 2\omega_E \cdot Vy + \ddot{x} \\ \frac{\partial V}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial y} = -\frac{GM}{r^3} y + \frac{3}{2} \frac{GMa_e^2 J_2}{r^5} y \left( 1 - 5 \frac{z^2}{r^2} \right) + \omega_E^2 \cdot y - 2\omega_E \cdot Vx + \ddot{y} \\ \frac{\partial V}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial z} = -\frac{GM}{r^3} z + \frac{3}{2} \frac{GMa_e^2 J_2}{r^5} z \left( 3 - 5 \frac{z^2}{r^2} \right) + \ddot{z} \end{array} \right. \cdot \quad (2)$$

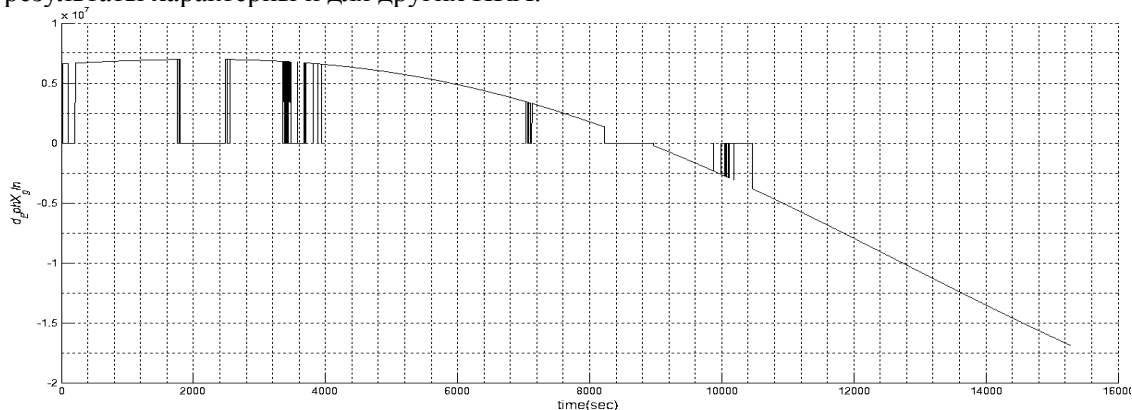
Четвертый алгоритм полностью соответствует первому, с той разницей, что элемент  $\left( 3 - 5 \frac{z^2}{r^2} \right)$  заменен на  $\left( 1 - 5 \frac{z^2}{r^2} \right)$ . Это обусловлено тем, что при выведении формул  $\frac{\partial V}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial R_i} \approx 0$ . Пятый алгоритм определяется формулой (3). Таким образом он

соответствует упрощенному алгоритму, с разницей в знаке перед  $2\omega_E \cdot Vx$ . Стоит отметить, что формулы для четвертого и пятого алгоритмов имели место в предыдущих версиях ИКД ГЛОНАСС. Формулы для алгоритмов отличаются по осям Y и Z, для оси X они одинаковы для всех соответствующих алгоритмов: 1-2; 1-4; 2-4; 3-5.

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x} = \frac{\partial x}{\partial t} = Vx \\ \dot{y} = \frac{\partial y}{\partial t} = Vy \\ \dot{z} = \frac{\partial z}{\partial t} = Vz \\ \frac{\partial V}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial x} = -\frac{GM}{r^3} x + \frac{3}{2} \frac{GMa_e^2 J_2}{r^5} x \left(1 - 5 \frac{z^2}{r^2}\right) + \omega_E^2 \cdot x + 2\omega_E \cdot Vy + \ddot{x} \\ \frac{\partial V}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial y} = -\frac{GM}{r^3} y + \frac{3}{2} \frac{GMa_e^2 J_2}{r^5} y \left(1 - 5 \frac{z^2}{r^2}\right) + \omega_E^2 \cdot y - 2\omega_E \cdot Vx + \ddot{y} \\ \frac{\partial V}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial z} = -\frac{GM}{r^3} z + \frac{3}{2} \frac{GMa_e^2 J_2}{r^5} z \left(1 - 5 \frac{z^2}{r^2}\right) + \ddot{z} \end{array} \right. \quad (3)$$

В алгоритмах 1, 2, 4 расчеты проводятся в неподвижной, относительно земли, системе координат и далее переводятся в подвижную. В алгоритмах 3, 5 расчеты сразу проводятся в подвижной системе координат.

Проведены исследования того, какой алгоритм размножения эфемерид, из указанных выше, является более точным. Исследование сделано на основе сравнения координат НАП, рассчитанных итерационным методом и геодезических координат стационарной НАП. Входными данными для расчета координат потребителя была эфемеридная информация (рис. 2), полученная с помощью различных алгоритмов. Как видно с рисунка, разница размноженных эфемерид для пятидесятого спутника (нумерация приемников фирмы NOVATEL, дата 13.05.2010) достаточно небольшая, и колеблется в пределе от нескольких миллиметров до нескольких метров. Данные результаты характерны и для других НКА.



**Рисунок 2. –Значения эфемерид (метры) для спутника №50, в зависимости от времени по оси X.**

Данные, записанные в файлы, были приведены в графическую форму, на которой изображена разница между рассчитанными координатами НАП и геодезическими – рисунок 3.

Определение наиболее корректного алгоритма проводилось определением выборочных параметров распределения (точечные оценки) встроенными функциями «Matlab»[7]:

STD – функция  $sx = \text{std}(X)$  в случае одномерного массива возвращает стандартное отклонение (СКО) элементов массива;

MEAN – функция  $mX = \text{mean}(X)$  в случае одномерного массива возвращает арифметическое среднее элементов массива (математическое ожидание);

VAR – функция  $Dx = \text{var}(X)$  в случае одномерного массива возвращает дисперсию элементов массива.

В таблице 1,2 приведены полученные результаты математического анализа результатов для всех алгоритмов, для которых проводилось исследование.

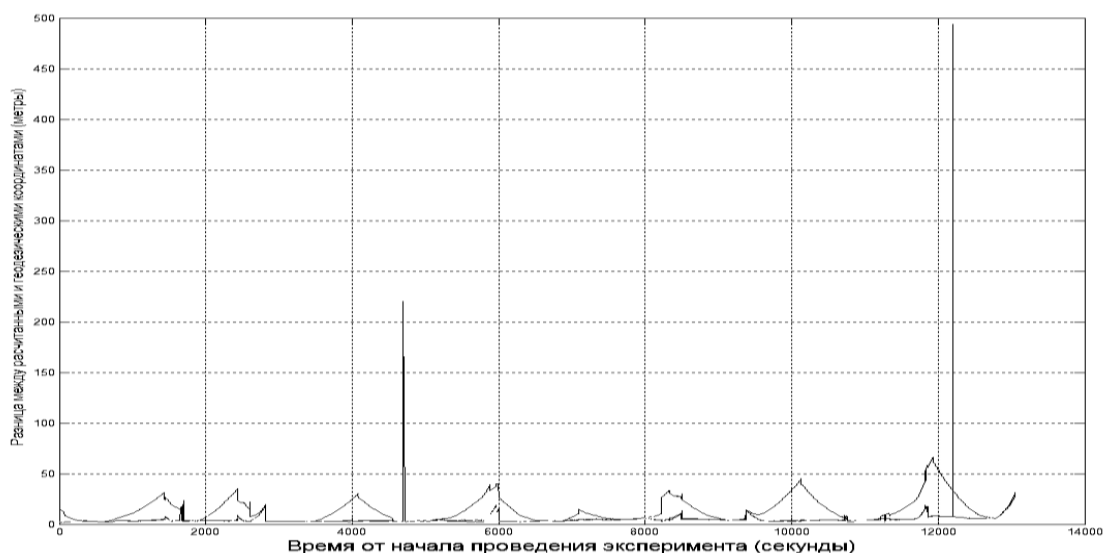


Рис. 3. Результаты расчета координат по различным входным данным для эфемерид

Таблица 1.

*Результаты математического анализа результатов по осям*

Алгоритм	Ось X			Ось Y			Ось Z		
	Mx	Dx	Sx	Mx	Dx	Sx	Mx	Dx	Sx
1	2.8023	10.4154	3.2273	-0.7298	3.1413	1.7724	1.9704	23.8946	4.8882
2	3.0616	10.3140	3.2115	-0.8072	2.9945	1.7305	1.9744	23.9882	4.8978
3	3.0607	10.3158	3.2118	-0.8072	2.9939	1.7303	1.9746	23.9906	4.8980
4	2.2586	7.2876	2.6996	-1.0705	2.0264	1.4235	12.3823	143.8657	11.9944
5	2.5170	7.3827	2.7171	-1.1479	1.9250	1.3874	12.3865	144.0756	12.0031

Таблица 2.

*Результаты математического анализа сферических результатов*

Алгоритм	Сферические результаты		
	Mx	Dx	Sx
1	4.4666	29.7685	5.4560
2	4.6544	29.5567	5.4366
3	4.6537	29.5610	5.4370
4	13.4112	132.8869	11.5277
5	13.4649	133.1548	11.5393

**Выводы.** По результатам, представленным в таблицах 1, 2, было определено, что наиболее точным является алгоритм №1, далее идут алгоритмы №№2, 3, разница между которыми была практически неощутимой. Самыми неточными алгоритмами оказались алгоритмы №№4, 5, что обосновывается упрощенной математической моделью и соответственно возможностью использовать более простые схемотехнические решения при проектировании НАП. Было произведено сравнение полученных результатов с результатами работы приемника Novatel PROPAK V3. Определено, что приемник работает по алгоритму, близкому к номерам 2,3 (точнее определить не представляется возможным в связи с маленькой разницей между данными алгоритмами). Результаты работы возможно использовать в любой области, которая имеет отношение к навигации. Основным же применением результатов работы следует считать:

- использование алгоритмов при создании более точной, быстродействующей, дешевой НАП;
- использование алгоритмов при проектировании новых модификаций спутниковых радионавигационных систем (СРНС);

- использование алгоритмов для проектирования функционального наземного и космического функционального дополнения для СРНС;
- использование алгоритмов при проведении высокоточных геодезических и картографических работ;
- использование алгоритмов в военных целях.
- использование алгоритмов при создании автоматизированных систем ремонта и модернизации спутников ГЛОНАСС на орбите.

Список литературы

1. Текст соглашения между Кабинетом Министров Украины и Правительством Российской Федерации о сотрудничестве в области использования и развития российской глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС от 17 мая 2010 года.
2. Основы эфемеридной астрономии / Абалакин В.К. – М.: Наука, 1979. – 448 с.
3. НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ / Г.Н. Дубошин / М.: Наука. Глав. ред. физ.-мат. лит. – 1968. - 800 с.
4. Системы спутниковой радионавигации / Конин В.В., Харченко В.П. / Национальный авиационный университет. – К.: Холтех, 2010. – 520 с.
5. **MIKE STEWART and MARIA TSAKIRI - GLONASS Broadcast Orbit Computation**, GPS Solutions, Vol. 2, No. 2, pp. 16-27 (1998).
6. ИКД ГЛОНАСС / редакция 5.1, 2008, Москва, 74с.
7. Математические расчеты на базе MATLAB / Иглин С.П. БХВ, 2005, Санкт-Петербург, Россия, 640 с.+CD