

## ОСОБЕННОСТИ ЭФЕМЕРИДНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЕЙСТВУЮЩИХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

*Выполнен анализ принципов формирования и пересчёта эфемеридной информации в действующих спутниковых радионавигационных системах GPS и ГЛОНАСС, европейской геостационарной службе навигационного покрытия EGNOS, а также перспективной системе Galileo.*

### **Введение**

Характерной чертой спутниковых радионавигационных систем (СРНС) является тот факт, что координаты спутников не постоянны во времени, а непрерывно изменяются. Для решения навигационной задачи любым из существующих методов необходимо иметь данные о положении навигационных спутников (НС) в пространстве в момент выполнения измерений. Таким образом, возникает задача обеспечения пользователя спутниковой навигации информацией о координатах НС используемой системы.

При существующем подходе к построению СРНС максимально возможный объем расчетов разработчики стараются перенести на наземный комплекс управления. Эфемеридное обеспечение поддерживается комплексом технических и программных средств, выполняющих радиоконтроль орбит спутников с нескольких наземных станций контроля, обработку результатов траекторных измерений и расчет эфемеридной информации, передаваемой далее с помощью загрузочных станций на спутник. Таким образом, по результатам доступных наблюдений сети станций контроля и наблюдения в вычислительном центре главной командной станции рассчитываются параметры орбит НС, которые в дальнейшем загружаются на спутники, откуда транслируются в виде эфемерид.

Для получения данных о текущем положении НС в пространстве программное обеспечение приёмника пользователя использует процедуру размножения эфемерид. Таким образом пользователь СРНС обеспечивается математической моделью движения НС по орбите.

### **Состояние проблемы.**

В функционирующей системе GPS модель движения НС представлена в оскулирующих элементах. Такая модель подразумевает, что траектория движения спутника разбивается на участки, на которых движение описывается кеплеровской моделью, параметры которой меняются во времени.

Данные эфемерид GPS содержат, в основном, параметры орбиты НС для краткосрочной полиномиальной модели орбиты по отношению к истинной траектории спутника. Параметры сохраняются и обновляются в сервере управления GPS, а затем обновляются в спутниках. На основе имеющихся параметров эфемерид алгоритм может оценить положение спутника в течение любого времени, пока спутник движется в рамках такой модели. Полиномиальные орбитальные модели имеют только одну степень свободы, то есть время. Опорным временем для параметров эфемерид и альманаха является время GPS, а именно: время недели GPS (TOW, time of week). Вычисление положения спутника производится в основном экстраполяцией положений спутников на орбите как функции времени, начиная с известного начального положения. Начальное положение также определяется текущими данными эфемерид и альманаха. Кроме того, временная метка указывает, когда спутник находится в заданном начальном орбитальном положении. Временные метки называются эфемеридным временем (TOE, time-of-ephemeris) для параметров эфемерид и временем применимости (TOA, time-of-applicability) для параметров альманаха. Как время TOE, так и время TOA измеряют по отношению к времени TOW GPS.

Вследствие сравнительно краткосрочной пригодности в общем случае для определения положения НС параметры эфемерид можно использовать только в течение 2-4 часов. С другой стороны, при такой краткосрочной пригодности можно достичь большей точности, чем при более долгосрочной пригодности. Достижимая точность составляет 2-5 м.

Данные эфемерид и альманаха передают со спутников GPS в формате, определенном в открытом документе по управлению интерфейсом GPS [1].

Аналогичный подход к заданию модели движения НС предусмотрен и в европейском проекте СРНС Galileo. Согласно опубликованной документации [2], форматы данных Galileo будут весьма близки к форматам GPS, но не будут совпадать с ними. Разработчики Galileo обещают лучшую точность определения координат пользователя, что возможно будет обеспечено большим количеством параметров, входящих в состав эфемерид. Кроме того, параметры эфемерид систем Galileo и GPS могут иметь различный срок действия.

В геостационарной службе навигационного покрытия EGNOS используются спутники Европейского космического агентства для передачи корректирующей информации пользователям системы GPS, а также для трансляции сигналов, аналогичных сигналам НС GPS. Это позволяет обеспечить пользователей дополнительными источниками псевдодальномерных данных. Однако для их включения в расчёт пользователь также должен быть обеспечен эфемеридами используемых геостационарных спутников. В EGNOS эфемериды представляют собой пространственные координаты спутников, а также их ускорения вдоль координатных осей. Положение геостационарного спутника является функцией времени и может быть определено в аппаратуре пользователя.

В системе ГЛОНАСС используется дифференциальная модель движения. Это означает, что для определения координат спутника на заданный момент времени требуется решить систему дифференциальных уравнений [3, 4]. Для решения этой системы нужны начальные значения. В случае ГЛОНАСС эти приближения передаются со спутника в составе навигационной информации. Спутники глобальной навигационной системы ГЛОНАСС передают навигационные сообщения содержащие координаты движения спутника в системе ПЗ-90.02. Эти данные обновляются каждые 15 минут.

Расчет размножения эфемерид навигационного спутника ГЛОНАСС производится в инерциальной геоцентрической системе координат. Взаимное расположение осей X и Y у инерциальной системы и системы ПЗ-90.02 характеризуется поворотом вокруг оси Z, связанным с вращением земли вокруг своей оси. Угол поворота S называется истинным звездным временем.

Формулы перевода координат и скоростей из гринвичской геоцентрической системы ПЗ-90.02 в WGS-84 имеют линейный вид. Коэффициенты формул являются функциями скорости вращения земли и истинного звездного времени.

Пересчет эфемерид ГЛОНАСС проводится методом численного интегрирования дифференциальных уравнений движения спутника, в которых учитываются ускорения, определяемые константой гравитационного поля Земли  $\mu$ , второй зональной гармоникой с индексом  $C_{20}$ , и ускорения от лунно-солнечных гравитационных возмущений. Уравнения движения интегрируются в прямоугольной инерциальной геоцентрической системе координат, связанной с текущими экватором и точкой весеннего равноденствия, методом Рунге-Кутты четвертого порядка. Лунно-солнечные ускорения являются функцией времени, и рассчитываются по астрономическим формулам один раз на весь интервал размножения.

Математическая модель движения НС ГЛОНАСС включает учёт следующих возмущений:

- гравитационного притяжения Земли в виде разложения геопотенциала по сферическим функциям до десятого порядка включительно, учитывая приливные вариации и вариации за счёт движения полюса Земли;
- гравитационного влияния Луны, Солнца и некоторых планет Солнечной системы, включая косвенное влияние сжатия Земли на пертурбационную функцию Луны;

- радиационного давления прямой и отражённой солнечной радиации на поверхность НС с учётом его формы и ориентации радиационных панелей относительно центра масс НС.

Сайт информационно-аналитического центра ГЛОНАСС в режиме реального доступа предоставляет возможность получения эфемерид всех действующих НС системы (рис.1) [5].

Эфемериды по данным альманаха КНС ГЛОНАСС											
NS	Дата	TΩ	Tоб	e	i	LΩ	ω	δI2	nl	ΔT	
01	21.03.11	13181.9375	40544.062	0.00051	64.55267	73.90606	16.85852	1.7929077E-4	1	-6.713867E-4	
02	21.03.11	18407.438	40544.094	0.00042	64.31888	52.0582	12.348633	2.1743774E-4	-4	-6.1035156E-4	
03	21.03.11	36390.03	40544.164	0.00159	65.73903	96.209335	160.67505	0.0	-6	6.1035156E-5	
04											
05	21.03.11	33438.438	40544.04	0.00058	64.54031	-10.773468	67.5	1.6403198E-4	1	-6.713867E-4	
06	21.03.11	38470.875	40544.117	0.00091	64.534996	-31.793919	123.79944	4.196167E-5	-4	-6.713867E-4	
07	21.03.11	3458.5312	40544.65	0.00075	63.478077	111.06406	118.87756	2.0980835E-4	5	-7.324219E-4	
08	21.03.11	8129.0625	40544.016	0.00022	64.31458	95.00221	28.306274	4.196167E-5	6	-7.324219E-4	
09	21.03.11	11394.4375	40544.1	0.0023	64.947845	-158.00194	15.325928	4.5776367E-5	-2	-1.2207031E-4	
10	21.03.11	16143.989	40544.11	0.00162	65.753105	-179.15697	161.86707	9.918213E-5	-7	-6.1035156E-5	
11	21.03.11	21282.25	40544.094	0.00194	65.3727	159.56903	-1.1151123	7.247925E-5	0	0.0	
12	21.03.11	26589.094	40544.082	0.00347	64.945786	138.52112	164.70154	1.9073486E-5	-1	-6.1035156E-5	
13	21.03.11	31563.5	40544.15	0.0005	65.360344	116.597046	92.30713	2.975464E-4	-2	6.1035156E-5	
14	21.03.11	36714.625	40544.08	0.00219	65.36395	95.06555	3.713379	1.7166138E-4	-7	6.1035156E-5	
15	21.03.11	1472.9062	40544.6	0.00243	65.73697	-117.89583	-7.3223877	-4.5776367E-5	0	-2.4414062E-4	
16	21.03.11	6331.7812	40544.156	0.00212	64.92964	-136.87025	149.04602	3.8146973E-5	-1	-3.0517578E-4	
17	21.03.11	9740.625	40543.96	0.0018	64.88141	-31.194134	-9.036255	2.784729E-4	4	7.324219E-4	
18	21.03.11	14819.125	40543.953	0.00267	64.8064	-53.104134	-21.780396	2.670288E-5	-3	3.6621094E-4	
19	21.03.11	19827.438	40543.91	0.00014	64.892914	-73.60274	-69.96094	1.5640259E-4	3	4.272481E-4	
20	21.03.11	25029.125	40543.992	0.00143	64.90596	-95.30365	-14.639282	7.6293945E-5	2	3.6621094E-4	
21	21.03.11	29953.562	40543.918	0.00198	64.81395	-116.302124	-179.41223	2.2506714E-4	4	3.0517578E-4	
22	21.03.11	35020.25	40543.867	0.00332	64.78992	-137.67706	-4.8998023	0.0	-3	3.0517578E-4	
23	21.03.11	40117.25	40543.92	0.00009	64.77223	-158.97508	88.64319	2.593994E-4	3	3.0517578E-4	
24	21.03.11	4597.7188	40543.86	0.00059	64.783905	-10.559063	86.92932	-5.722046E-5	2	5.493164E-4	

Рис. 1.

Для обеспечения ГЛОНАСС параметрами вращения Земли в системе организовано оперативное определение координат полюса Земли, эксцесса длительности суток по данным измерений КС на основе совместного уточнения ПВЗ и вектора состояния системы. Специально разработанные методики позволяют определить и всемирное время в процессе эфемеридного обеспечения системы. Точность получаемых результатов оценивается для координат полюса на уровне 15 ... 20 см, для длительности земных суток – 0,5 мс и для всемирного времени – 1 мс. Регулярное определение ПВЗ по данным наблюдений НС в режиме оперативной службы осуществляется наземным комплексом ГЛОНАСС с 1984 г.

### Выводы

Существующие СРНС, реализуемые проекты спутниковой навигации, а также функциональные дополнения космического базирования используют три подхода к формированию эфемерид используемых спутников. Для выполнения пользователем расчёта пространственных положений НС в момент выполнения измерений в разных системах используются различные алгоритмические методы.

При реализации методов совместной обработки данных, поступающих от спутников разных систем, аппаратура пользователя должна быть обеспечена возможностью пересчёта эфемерид НС по соответствующим каждой системе алгоритмам.

### Список литературы

1. ICD-GPS-200 Interface Control Document, 2000
2. L1 band part of Galileo Signal in Space ICD (SIS ICD), 2005
3. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС (Интерфейсный контрольный документ) / Координац. науч.-информ. центр РФ.- М., 2008.
4. ГОСТ Р 52865-2009 «Глобальная Навигационная Спутниковая Система. Параметры радионавигационного поля. Технические требования и методы испытаний»
5. <http://www.glonass-center.ru>