

III. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФЕМЕРИДНО-ВРЕМЕННОЙ
ИНФОРМАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ГНСС В
СРОЧНОМ РЕЖИМЕ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ****И.В. Безменов, С.Л. Пасынок**

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.

bezmenov@vniiftri.ru

Разработаны алгоритм и программа расчета в срочном режиме эфемеридно-временной информации (координат и поправок часов) космических аппаратов ГНСС (ГЛОНАСС и GPS) по данным, полученным со станций слежения. Представлены результаты проведенных тестовых расчетов за январь 2013 г. по результатам обработки данных измерений 450 станций сети IGS.

An algorithm and a program for evaluation of rapid GNSS (GPS and GLONASS) satellite orbits as well as clock corrections using the global GNSS network measurement data are developed. Test results obtained by the program using measurement data from 450 stations of global IGS network are presented.

Ключевые слова: космические аппараты, данные по орбитам, комплекс формирования эфемеридно-временной информации космических аппаратов ГЛОНАСС (ПАК ЭВИ КА ГНСС), станции наблюдения, программы вычисления орбит по данным навигационных измерений в срочном режиме, двухчастотный приёмник, эфемериды, поправки часов спутников

1. Введение

Как известно, эфемеридно-временная информация (ЭВИ) космических аппаратов (КА) ГНСС (ГЛОНАСС+GPS) является основой для многих приложений в области космической геодезии, проведения кадастровых работ, точного позиционирования объектов, как неподвижно расположенных на поверхности Земли, так и перемещающихся в околоземном пространстве. Ряд аналитических центров, как за рубежом, так и на территории РФ, осуществляют расчеты орбит и поправок часов КА ГНСС в оперативном режиме по данным, полученным со станций слежения, входящих в международную сеть IGS [1]. Получаемые разными Центрами значения ЭВИ при этом могут отличаться друг от друга. Поскольку точные значения координат орбит остаются неизвестными, то для получения опорных значений прибегают к процедуре комбинирования [2-3]. Именно таким образом, начиная с 1993 г., получают т.н. точные орбиты IGS (США) для спутников GPS. Аналогичная процедура в рамках программы IGLOS-PP (International GLONASS Service Pilot Project) применяется Центром NOAA/NGS (США) [4] с 2004 г. до настоящего момента для получения орбит КА ГЛОНАСС. Данные по орбитам ГЛОНАСС формируются этим Центром на основе комбинированной обработки девяти аналитических центров и выкладываются в виде готовых продуктов на зарубежных серверах.

Возрастающая роль данных по орбитам КА ГЛОНАСС, используемых в решении многих прикладных задач космической геодезии, диктует необходимость иметь аналогичные продукты, формируемые уполномоченной российской метрологической организацией, которые могли бы служить официальными данными на территории РФ.

2. Разработка ПАК ЭВИ КА ГНСС (ГМЦ ГСВЧ)

Для решения сформулированной выше задачи в Главном метрологическом центре Государственной службы времени и частоты и определения параметров вращения Земли (ГМЦ ГСВЧ) ФГУП «ВНИИФТРИ» была инициирована разработка программно-аппаратного комплекса формирования эфемеридно-временной информации космических аппаратов ГНСС (ПАК ЭВИ КА ГНСС). Данный комплекс предназначен для выполнения в непрерывном автоматическом режиме следующих задач:

1. Сбор измерительной информации (в формате RINEX n/g/d), поступающей с пунктов слежения за КА ГНСС на серверы международных баз данных, и размещение ее в БД ГМЦ ГСВЧ, ФГУП «ВНИИФТРИ» (см. рис. 1).

2. Расчет орбит и поправок часов космических аппаратов (КА) ГЛОНАСС в трех следующих режимах:

а) *оперативном* с задержкой в 6 часов и периодичностью 4 раза в сутки;

б) *срочном* с задержкой в 1 сутки и периодичностью 1 раз в сутки;

в) *апостериорном* с задержкой в 2 недели и периодичностью 1 раз в сутки.

3. Формирование отчетов и выкладывание ежедневно и еженедельно соответствующей информации на ftp-сервер ГМЦ ГСВЧ в формате SP3.



Рис. 1. Функциональная схема ПАК ЭВИ КА ГНСС (ГМЦ ГСВЧ)

Результаты по формированию апостериорной ЭВИ, получаемые для значений орбит и поправок часов КА ГНСС на основе процедуры комбинирования, были представлены авторами в [5-6].

В настоящей работе представлены результаты разработки программы расчета в срочном режиме орбит и поправок часов КА ГНСС по данным навигационных измерений в формате RINEX, получаемых со станций наблюдения, входящих в международную сеть IGS.

ПАК ЭВИ КА ГНСС в процессе вычисления орбит и поправок часов КА ГНСС решает множество вспомогательных задач:

- работа с системами нормальных уравнений,
- формирование оптимальной системы базовых линий сети станций,
- работа с файлами измерений (в формате RINEX),
- отбраковка «плохих» станций с большими пробелами в данных,
- синхронизация шкал времени (ШВ) приемников с системным временем группировки КА, при этом учитываются дифференциальные поправки к кодовым измерениям (P1C1, P1P2) – т.к. называемые DCB-поправки (differential code biases),
- вывод информации с результатами отдельных этапов обработки,
- экстраполяция координат станций на данную эпоху,
- оценивание координат станций и относящихся к станции параметров – тропосферы с учетом атмосферных и атмосферных приливных нагрузок,
- формирования матрицы системы нормальных уравнений,
- получение и анализ матрицы невязок и осуществление чистки с удалением «плохих» станций и спутников из процесса обработки,
- разрешение фазовых неоднозначностей в целочисленном виде с использованием линейных комбинаций (Мельбурн-Вуббена, L3 – свободной от ионосферы и др.) с применением различных стратегий для различных длин базовых линий (QIF – quasi ionosphere free, SIGMA – с использованием статистических методов и др.),
- детальный вывод результатов работы отдельных программных модулей,
- осуществление преобразований Гельмерта,
- предварительная обработка результатов наблюдений,
- интегрирование орбит КА с учетом всех известных на сегодняшний день возмущающих факторов кеплеровского движения КА,
- преобразование файлов точных орбит в файлы табличных орбит (в инерциальной системе координат),
- чистка и сглаживание данных из файлов наблюдений,
- определение скачков в ШВ отдельных станций,
- извлечение информации о наблюдениях за КА,
- представление результатов с помощью псевдографики,
- маркировка/удаление наблюдений, формирование базовых линий, сравнение орбит КА, и др.

3. Вычисление орбит КА ГНСС в срочном режиме

Задача вычисления орбит КА ГНСС является составной частью общей задачи определения ЭВИ КА ГНСС.

Процесс вычисления срочных орбит представляет собой задачу по уточнению для каждого из КА 15 параметров, в которые входят:

а) орбитальные параметры – шесть Кеплеровских оскулирующих элементов (начальные условия в начале дуги);

б) девять параметров эмпирической модели радиационного давления [Beutler et al., 7].

Процесс уточнения орбит начинается с априорных орбит, в качестве которых выступают орбиты, спрогнозированные в предыдущие сутки, или орбиты, полученные из навигационных сообщений (RINEX n/g).

Для осуществления интегрирования априорные орбиты преобразуются в табличный формат в геоцентрической инерциальной системе отсчета ECI (Earth-Centered Inertial Coordinate System). Для того чтобы получить согласованные представления табличных орбит, особое внимание уделяется используемой информации о параметрах вращения Земли. В данной работе в целях тестирования использовались данные UT1–UTC из бюллетеней IERS, напр., Bulletin A или C04, охватывающие требуемый временной период.

Оцениваемые орбиты всегда относятся к центру масс спутников. Данные измерений, в свою очередь, привязаны к фазовому центру антенны, не совпадающему, как правило, с центром масс спутника. Информация о смещении (относительно центра масс) фазового центра антенны спутника берется из файла информации о спутниках (напр., SATELLIT.I08, SATELLIT.I14), а также из файла (напр., PCV.I08) с модельными данными по распределению фазового центра антенны спутника в зависимости от надира в предположении номинальной ориентации спутника. Эти данные используются в процессе интегрирования орбит.

В настоящем подходе на первом шаге уточняются орбиты КА GPS, попутно вычисляются параметры тропосферы станций, уточняются координаты приемников и производится синхронизация ШВ приемников с системной ШВ GPS.

После серии итераций по уточнению орбит GPS на втором шаге по аналогичной схеме осуществляется уточнение орбит КА ГЛОНАСС. При этом в качестве априорных координат станций и параметров тропосферы выступают параметры, полученные на предыдущем шаге при расчете орбит КА GPS.

Для оценивания орбит КА строится система базовых линий (без переопределенности) с применением стратегии, в которой учитываются только двухчастотные измерения с наибольшим количеством взаимных наблюдений спутников. Т.к. в обработке участвуют данные от примерно 450 станций, то перебор всевозможных пар станций (после предварительного

отсева их остается ~ 50000) требует значительных затрат компьютерного времени. С целью сокращения времени расчетов процесс построения базовых линий для данной стратегии был распараллелен. Это позволило почти в 2 раза сократить время реализации всего процесса обработки на многопроцессорной вычислительной системе ГМЦ ГСВЧ.

4. Вычисление поправок часов КА ГНСС

Поправки часов $c\delta_k$ и $c\delta^i$ приемника и спутника, входящие в уравнения наблюдения, определены относительно системных ШВ: GPS или ГЛОНАСС. Для большинства приложений эти параметры представляют собой огромное количество не имеющих интереса неизвестных. При формировании двойных разностей из уравнений наблюдений данные параметры исключаются.

В других приложениях, таких как передача времени с использованием измерений ГНСС, требуется, чтобы указанные выше параметры часов были вычислены, а не исключены формированием двойных разностей. Если, например, некоторые приемники (k и ℓ) в сети соединены с “высоко стабильными” часами (находящимися, например, в лабораториях времени), то показания этих часов можно сравнивать между собой, вычисляя разности $(\delta_k - \delta_\ell)$. Если внутренние часы приемника, для которых оцениваются параметры δ_k часов, могут быть измерены относительно других часов или относительно UTC (k) лаборатории времени, то для каждой эпохи, для которой оцениваются параметры часов, в итоге может быть получена разность UTC(k) – UTC(ℓ). Таким образом, в сетевом решении показания всех участвующих часов могут быть сравнены между собой эпоха за эпохой. Если внутренние часы приемника управляются внешними часами, то разность их показаний неизвестна (но постоянна), тогда оценки δ_k для часов приемника могут использоваться для передачи частоты. Отметим, что поправки часов спутников наряду с их орбитами представляют интерес, например, для методов PPP – precise point positioning (прецизионное точечное позиционирование).

Поскольку в уравнениях наблюдения фигурируют только разности между параметрами часов приемника и спутника ($c\delta_k - c\delta^i$), то параметры часов можно определить только в относительном смысле. Могут быть оценены, например, параметры для всех часов, кроме каких-либо одних, т.е. одни из часов приемника или спутника должны быть фиксированы. С другой стороны, в качестве опорных часов может быть выбран ансамбль часов. При этом на сумму их оцениваемых поправок часов может быть наложено условие нулевого среднего. Выбранные опорные часы должны быть синхронизированы относительно системного времени GPS.

В процессе вычисления поправок часов осуществляется детектирование скачков времени. Скачок в показаниях часов – это разрыв во временных рядах показаний времени часов, который не может быть смоделирован непрерывной функцией. Чтобы различать в показаниях часов шум от скачков, размер скачка должен быть значительно больше, чем среднее изменение показаний часов между двумя эпохами. Цель обнаружения скачка часов состоит в том, чтобы получить приемлемую модель поведения часов при экстраполяции их показаний и обновить статистическую информацию в выходных результатах программы.

5. Результаты вычисления ЭВИ КА ГНСС

5.1. Эфемериды КА ГНСС

Для контроля точности вычисления ЭВИ КА ГНСС по разработанной в ГМЦ ГСВЧ методике были проведены тестовые расчеты за период: 01.01.2013 – 31.01.2013.

Первым шагом к получению полной ЭВИ КА ГНСС является оценивание эфемерид КА. В качестве исходных данных выступают данные измерений в формате RINEX (d/g/n), полученные с более чем 450 станций слежения, входящих в международную сеть IGS. Оценка точности вычисленных срочных эфемерид (аббревиатура “VNF”) спутников GPS осуществлялась путем сравнения полученных орбит (координат спутников) с апостериорными орбитами, полученными международной службой IGS (США), а спутников ГЛОНАСС – с апостериорными орбитами IGL, полученными международной службой NOAA/NGS (США).

Зависимость СКП от номера итерации при уточнении орбит для каждого из КА GPS за 07.01.2013 представлены в следующей таблице.

Таблица 1

Зависимость от номера итерации СКП (м) орбит КА GPS, оцененных в ГМЦ ГСВЧ, относительно апостериорных орбит IGS. Дата: 07.01.2013.

PR N	№ итерации			
	0 (прогноз)	1	2	... 8
G01	0.0204	0.0196	0.0210	0.0178
G02	0.1011	0.0220	0.0122	0.0108
G03	0.0611	0.0228	0.0235	0.0192
G04	0.0489	0.0153	0.0198	0.0149
G05	0.0773	0.0243	0.0181	0.0153
G06	0.0990	0.0475	0.0317	0.0229
G07	0.1312	0.0325	0.0131	0.0126
G08	0.0778	0.0173	0.0144	0.0129
G09	0.1494	0.0314	0.0160	0.0161

Продолжение таблицы 1

G10	0.0463	0.0103	0.0134	0.0086
G11	0.0583	0.0206	0.0219	0.0164
G12	0.0486	0.0259	0.0249	0.0230
G13	0.0461	0.0242	0.0240	0.0149
G14	0.0498	0.0150	0.0145	0.0124
G15	0.1399	0.0294	0.0212	0.0215
G16	0.1159	0.0472	0.0274	0.0151
G17	0.1180	0.0301	0.0151	0.0127
G18	0.0615	0.0128	0.0158	0.0164
G19	0.1187	0.0291	0.0201	0.0175
G20	0.0725	0.0247	0.0261	0.0166
G21	0.0326	0.0109	0.0147	0.0146
G22	0.0640	0.0122	0.0103	0.0122
G23	0.5924	0.4625	0.3340	0.0104
G24	0.0594	0.0263	0.0232	0.0237
G25	0.0414	0.0195	0.0214	0.0205
G26	0.0769	0.0296	0.0252	0.0230
G28	0.0576	0.0185	0.0158	0.0117
G29	0.0401	0.0167	0.0178	0.0156
G31	0.0919	0.0283	0.0135	0.0127
G32	0.0596	0.0277	0.0253	0.0172
Σ	0.1349	0.0883	0.0643	0.0165

Из этой таблицы видно, что уже после второй итерации СКП (относительно IGS) параметров орбит почти всех КА находятся в пределах 3 см. Исключение составил КА PRN=G23: из-за слишком большого отклонения спрогнозированной для этого КА орбиты (СКП ~ 0.59 м) понадобилось еще 6 итераций, чтобы СКП данного КА оказалась ~ 1 см.

На рис. 2–3 представлен процесс сходимости орбит КА GPS PRN=G23 за 07 января 2013 г. На рис. 2 представлены значения отклонений и данные по СКП в направлениях: по радиусу, вдоль орбиты и перпендикулярно плоскости орбиты для: а) спрогнозированной орбиты КА PRN=G23 – рис. 2 и б) орбиты этого же КА, полученной после 8-й итерации – рис. 3.

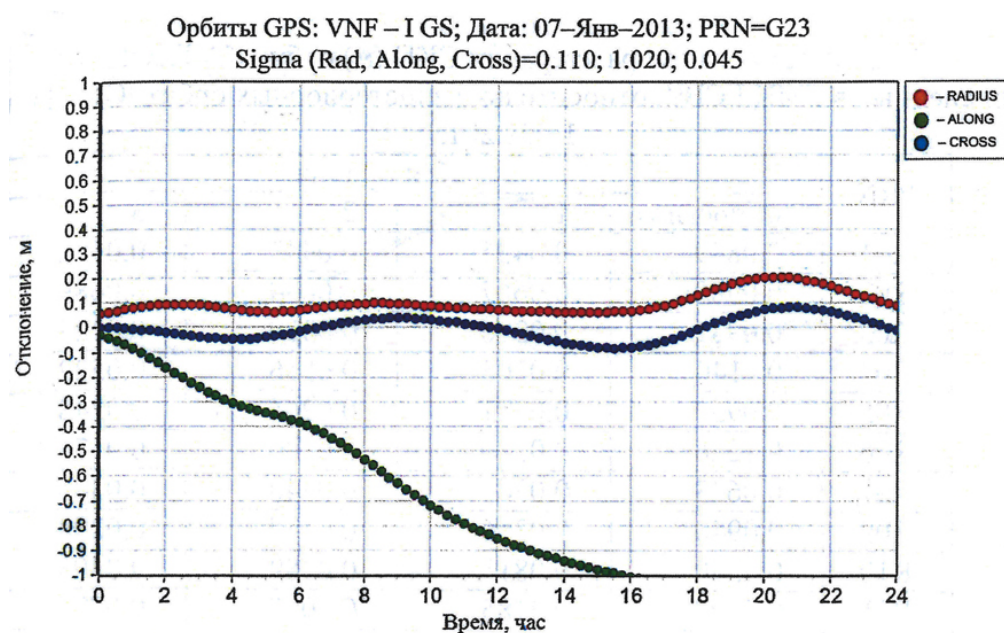


Рис. 2. Сравнение спрогнозированной орбиты спутника GPS (PRN=G23), полученной в ГМЦ ГСВЧ, с апостериорной орбитой IGS. Дата: 07.01.2013

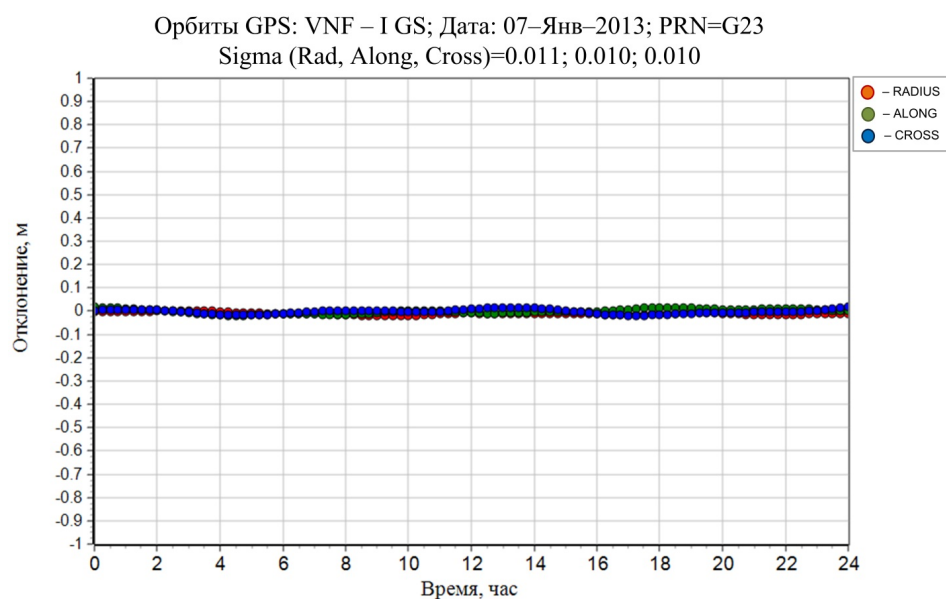


Рис. 3. Сравнение уточненной после 8-й итерации орбиты КА GPS (PRN=G23), полученной в ГМЦ ГСВЧ, с апостериорной орбитой IGS. Дата: 07.01.2013

Аналогичные данные по уточнению орбит для КА ГЛОНАСС за 13 января 2013 г. представлены в табл. 2 и на рис. 4-5.

Таблица 2

Зависимость от номера итерации СКП (м) орбит КА ГЛОНАСС, оцененных в ГМЦ ГСВЧ, относительно апостериорных орбит IGL. Дата: 13.01.2013.

PRN	№ итерации			
	0 (прогноз)	1	2	3
R01	0.0849	0.0435	0.0443	0.0492
R02	0.0980	0.0667	0.0639	0.0689
R03	0.0931	0.0396	0.0329	0.0323
R04	0.1140	0.0705	0.0556	0.0522
R05	0.0950	0.0371	0.0264	0.0248
R06	0.1226	0.0310	0.0190	0.0174
R07	0.0623	0.0363	0.0340	0.0345
R09	0.0940	0.0356	0.0287	0.0298
R10	0.3590	0.0811	0.0389	0.0403
R11	0.4707	0.2185	0.1067	0.0724
R12	0.0721	0.0461	0.0386	0.0329
R13	0.1208	0.0642	0.0484	0.0440
R14	0.0856	0.0484	0.0496	0.0534
R15	0.0718	0.0383	0.0341	0.0421
R16	0.1786	0.0699	0.0318	0.0298
R17	0.0899	0.0534	0.0580	0.0528
R18	0.1633	0.0569	0.0262	0.0208
R19	0.1079	0.0390	0.0392	0.0413
R20	0.1099	0.0408	0.0286	0.0262
R21	0.2350	0.1067	0.0668	0.0607
R22	0.1123	0.0328	0.0323	0.0322
R23	0.0876	0.0307	0.0287	0.0331
R24	0.1714	0.0508	0.0400	0.0385
Σ	0.1686	0.0700	0.0462	0.0428

Для иллюстрации сходимости параметров орбиты выбран КА с системным номером R10 с большим СКП спрогнозированной орбиты (0.36 м).

На рис. 4 представлены отклонения и данные по СКП в направлениях: по радиусу, вдоль орбиты и перпендикулярно плоскости орбиты для спрогнозированной орбиты, а на рис. 5 – для орбиты этого же спутника, полученной после 3-й итерации.

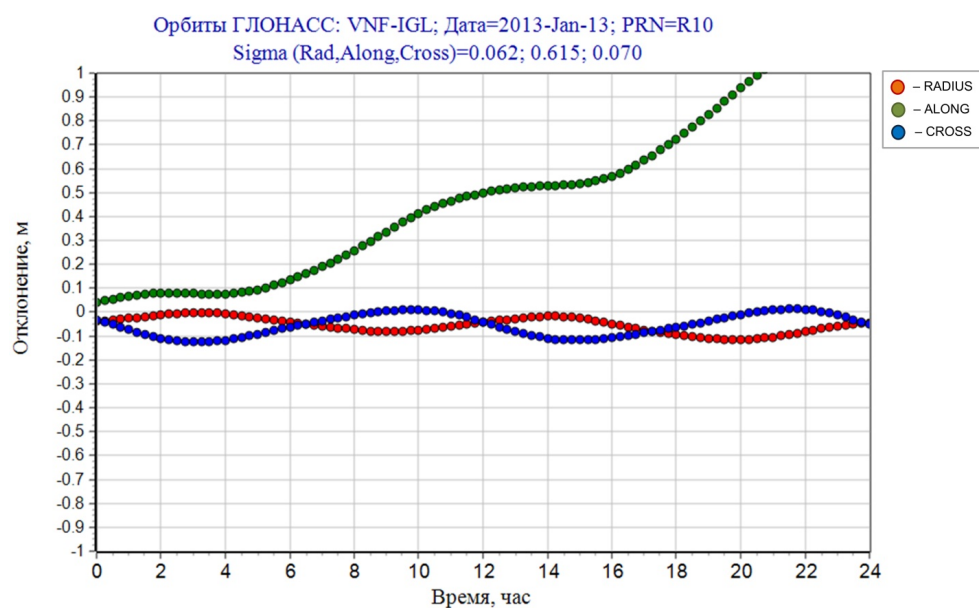


Рис. 4. Сравнение спрогнозированной орбиты спутника ГЛОНАСС (PRN=R10), полученной в ГМЦ ГСВЧ, с апостериорной орбитой IGL. Дата: 13.01.2013

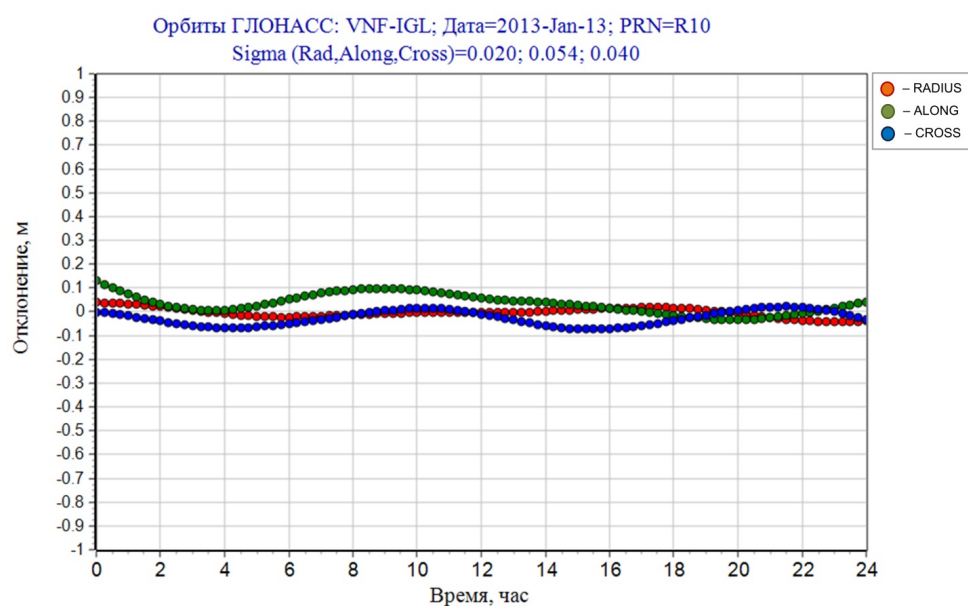


Рис. 5. Сравнение уточненной после 3-й итерации орбиты спутника ГЛОНАСС (PRN=R10), полученной в ГМЦ ГСВЧ, с апостериорной орбитой IGL. Дата: 13.01.2013

5.2. Поправки часов КА ГНСС

Следующий шаг к формированию полной ЭВИ КА ГНСС состоит в вычислении поправок часов КА по данным измерений, а также по результатам, полученным на этапе оценивания эфемерид КА. В качестве исходных данных берутся данные измерений (в формате RINEX d/g/n), полученные со станций слежения – 450 станций для КА GPS и 215 станций для КА ГЛОНАСС. В качестве внешних данных выступают оцененные эфемериды КА, параметры тропосферы станций и уточненные координаты станций.

Для получения точностных характеристик оцененных поправок часов КА GPS были рассмотрены аналогичные данные, полученные другими Центрами, перечисленными в таблице 3.

Таблица 3

Центры обработки и анализа данных

№	Название	Аббрев.
1	Международная служба ГНСС США	IGS
2	Европейский центр определения орбит, г. Берн, Швейцария	COD
3	Министерство природных ресурсов Канады	EMR
4	Европейское космическое агентство, Германия	ESA
5	Национальный центр космических исследований, Франция	GRG
6	Массачусетский технологический институт, США	MIT
7	Центр обработки и анализа данных – NOAA/NGS, США	NGS
8	СВОЭВП, РФ	PMK
9	Данные из навигационных сообщений	BRD
10	ГМЦ ГСВЧ ФГУП ВНИИФТРИ, РФ	VNF

На рис. 6 представлены поправки часов для КА GPS с системным номером PRN=G14 (выбор номера КА случайный), оцененные различными Центрами из табл. 3, на 01.01.2013 г. На том же рисунке приведены СКП (относительно данных IGS) поправок часов указанных Центров, вычисленных по всем 96 эпохам.

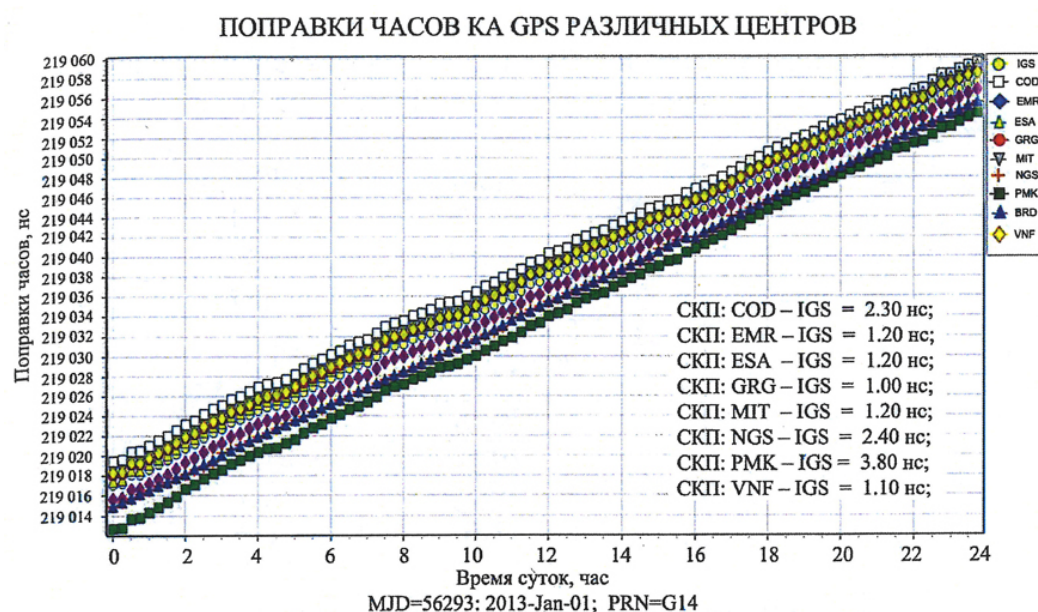


Рис. 6. Поправки часов КА GPS (PRN=G14) различных Центров. Дата: 01.01.2013

На рис. 7 приведены СКП (относительно данных IGS) поправок часов указанных выше Центров, для каждого из КА GPS на ту же дату.

СКП ПОПРАВКИ ЧАСОВ КА GPS РАЗЛИЧНЫХ ЦЕНТРОВ ОТНОСИТЕЛЬНО IGS

МJD=56293: 2013-Jan-01

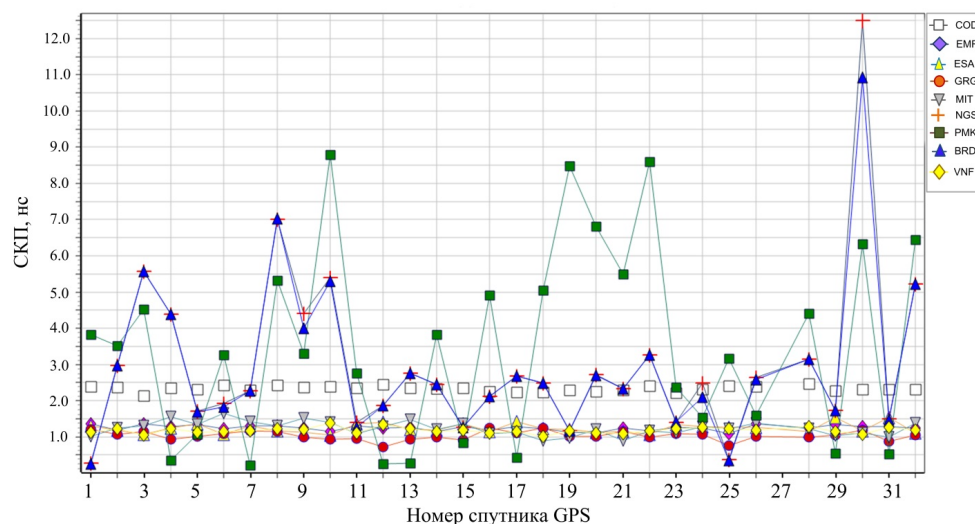


Рис. 7. СКП относительно данных IGS поправок часов спутников GPS различных Центров. Дата: 01.01.2013.

В табл. 4 представлены данные по СКП для рассматриваемых Центров, вычисленные по всем эпохам и всем КА GPS.

Таблица 4

СКП поправок часов КА GPS (по сравнению с IGS), оцененных различными Центрами. Дата: 01.01.2013.

№	Центр	СКП, нс
1	COD	2.334
2	EMR	1.254
3	ESA	1.247
4	GRG	1.043
5	MIT	1.251
6	NGS	3.798
7	PMK	4.381
8	BRD	3.606
9	VNF	1.183

Оцененные в ГМЦ ГСВЧ поправки часов КА ГЛОНАСС сравнивались с аналогичными данными, полученными другими Центрами, перечисленными в табл. 5.

Таблица 5

Центры обработки и анализа данных

№	Название	Аббрев.
1	Европейское космическое агентство, Германия	ESA
2	Национальный центр космических исследований, Франция	GRG
3	Информационный Аналитический центр ГЛОНАСС, ЦНИИМАШ, РФ	IAC
4	Центр обработки и анализа данных – NOAA/NGS, США	IGL
5	СВОЭВП, РФ	PMK
6	Данные из навигационных сообщений	BRD
7	ГМЦ ГСВЧ ФГУП ВНИИФТРИ, РФ	VNF

В отличие от поправок часов КА GPS в случае с КА ГЛОНАСС опорных значений для поправок часов нет, т.к. IGL поправки часов не оценивает. Поэтому для расчетов СКП мы прибегаем к процедуре комбинирования для определения опорных значений поправок часов.

На рис. 7 представлены поправки часов для КА ГЛОНАСС с системным номером PRN=R06 (выбор номера КА случайный), оцененные различными Центрами из табл. 5, на 01.01.2013 г. На том же рисунке приведены СКП поправок часов указанных Центров, вычисленные по всем 96 эпохам, относительно опорных данных – REF (расчетные формулы представлены ниже).

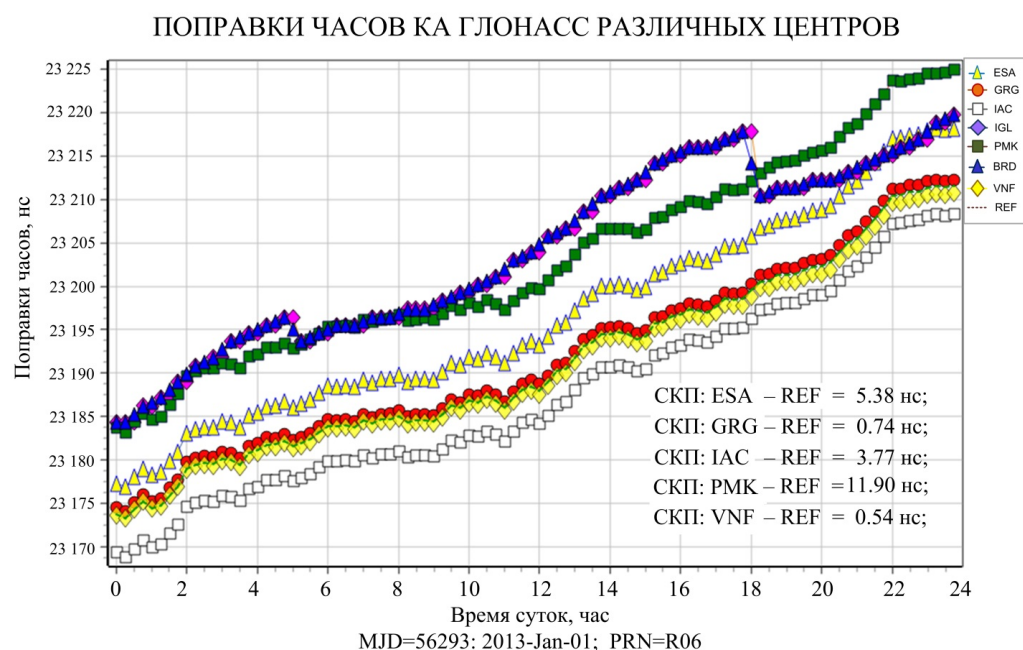


Рис. 7. Поправки часов КА ГЛОНАСС (PRN=R06), полученные в ГМЦ ГСВЧ (VNF) и в других Центрах

Так как поправки часов для VNF вычислялись по ШВ GPS, то для сравнения с результатами других центров поправки часов VNF были приведены к ШВ ГЛОНАСС. Процедура приведения к ШВ ГЛОНАСС состоит в отыскании параметров смещения T_{offset} и дрейфа d , минимизирующих функционал:

$$\sum_{Sat=1..NSat} \sum_{k=1..K} \left| \delta_{VNF,k}^{Sat} - T_{offset} - (k-1) \cdot d \Delta t - \delta_{BRD,k}^{Sat} \right| \xrightarrow{T_{offset}, d} \min, \quad (1)$$

где $NSat$ – количество спутников, K – количество эпох, $\delta_{VNF,k}^{Sat}$, $\delta_{BRD,k}^{Sat}$ – поправки часов спутника с системным номером Sat , оцененные VNF, и полученные из навигационных сообщений соответственно; k – номер эпохи, Δt – временной интервал между двумя эпохами.

Аналогичная процедура приведения к системной ШВ ГЛОНАСС была применена к поправкам часов IGL.

Значения параметров для VNF составили: $T_{offset} = -337.51$ нс; $d = -2.76E-05$ нс/с.

В табл. 6 представлены данные по СКП для рассматриваемых Центров, вычисленные по всем эпохам и всем КА ГЛОНАСС, относительно опорных данных REF.

Таблица 6

СКП поправок часов КА ГЛОНАСС, оцененных различными Центрами за 01.01.2013

№	Центр	СКП, нс
1	ESA	3.979
2	GRG	1.521
3	IAC	2.691
4	PMK	9.046
5	VNF	0.990

Сравнение производилось с временным рядом $\delta_{k,Ref}^{Sat}$, выступающим в роли опорного, который получается в результате комбинирования по формулам (см. [3]):

$$\delta_{k,Ref}^{Sat} = \frac{\sum_{Center} \delta_{k,Center}^{Sat} \cdot \sigma_{Center}^{-2}}{\sum_{Center} \sigma_{Center}^{-2}}, \quad (2)$$

где k – номер эпохи, Sat – индекс спутника, $Center$ – индекс Центра, $\delta_{k,Center}^{Sat}$ – поправки часов спутника Sat , оцененные центром $Center$ в эпоху k ,

σ_{Center} – сигма Центра:

$$\sigma_{Center} = \left(\frac{1}{NSat \cdot K} \sum_{Sat,k} (\delta_{k,Center}^{Sat} - \bar{\delta}_k^{Sat})^2 \right)^{1/2}; \quad \bar{\delta}_k^{Sat} = \frac{1}{NCenter} \sum_{Center} \delta_{k,Center}^{Sat}, \quad (3)$$

$NCenter$ – количество Центров.

6. Заключение

Используемая схема обработки показала по данным тестовых расчетов быструю сходимость (2–3 итерации) процесса уточнения орбит КА ГНСС (см. табл. 1–2). Для установления параметров орбит отдельных КА требова-

лись дополнительные итерации.

Проведенные за указанный выше промежуток времени расчеты орбит и поправок часов показали, что: а) значения СКП вычисленных в ГМЦ ГСВЧ орбит VNF КА GPS оказались не более 2 см (сравнение проводилось с апостериорными орбитами IGS); б) СКП вычисленных орбит VNF КА ГЛОНАСС составили ~ 4-5 см (сравнение с апостериорными орбитами IGL).

Проведенный анализ значений оцененных Аналитическими центрами (см. табл. 3) поправок часов КА GPS за 01.01.2013 показал, что: а) СКП вычисленных в ГМЦ ГСВЧ поправок часов КА GPS по сравнению с аналогичными данными IGS составили ~1 нс для всех КА; б) суммарная СКП, вычисленная по всем КА, составила 1.18 нс. Из 9 рассмотренных Центров меньшее СКП оказалось только у GRG: 1.04 нс (см. табл. 4).

Проведенный анализ значений оцененных Аналитическими центрами (см. табл. 5) поправок часов КА ГЛОНАСС за 01.01.2013 показал, что: а) СКП вычисленных в ГМЦ ГСВЧ поправок часов КА ГЛОНАСС по сравнению с референсными значениями $\delta_{k,Ref}^{Sat}$, определяемыми по формулам (2)–(3), составили ~1–2 нс для всех КА; б) суммарная СКП, вычисленная по всем КА, составила 0.99 нс. (см. табл. 6); в) поправки часов, представляемые IGL, отличаются от поправок навигационных сообщений на величину постоянного сдвига, обусловленного разностью системных ШВ GPS и ГЛОНАСС (~320 нс). На рис. 7 поправки IGL представлены после устранения этого сдвига.

Примечание. При вычислениях использовались программные модули Бернского ПО обработки ГНСС измерений версии 5.2 (BERNESE 5.2), некоторые из которых были адаптированы к распараллеливанию, бернское ядро обработки BPE (Bernese Processing Engine), методы BPE, позволяющие также вести обработку на многопроцессорных вычислительных системах в параллельном режиме. При написании программ и скриптов использовались языки программирования FORTRAN-90, Delphi XE7, Perl 6.0.

Литература

1. Электронный ресурс. <http://www.igs.org/network>.
2. Beutler G., Kouba J. and T. Springer, 1995, Combining the orbits of the IGS Analysis Centers, Bulletin Geodesique, 69, pp. 200-222.
3. Kouba J., Mireault Y. and F. Lahaye, 1995, 1994 IGS Orbit/Clock Combination and Evaluation, Appendix I of the Analysis Coordinator Report, International GPS Service for Geodynamics (IGS) 1994 Annual Report, pp. 70-94.
4. Электронный ресурс. <https://www.ngs.noaa.gov/>
5. Безменов И.В., Пасынок С.Л. Формирование опорных значений координат и поправок часов КА ГЛОНАСС// Альманах современной метрологии, 2015, №2, стр. 143-158.

6. Bezmenov I.V., Pasynok S.L. GLONASSorbit\clock combination in VNIIFTRI, Proceedings of the Journées 2014 "Systemes de reference spatio-temporels", Malkin Z. and Capitaine N. (eds), Pulkovo observatory, 2015, p. 215-216.
7. Beutler, G., E. Brockmann, W. Gurtner, U. Hugentobler, L. Mervart, M. Rothacher, and A. Verdun. Extended orbit modeling techniques at the CODE processing center of the International GPS Service for Geodynamics (IGS): Theory and initial results. *Manuscripta Geodaetica*, 19 (6):367–386, April 1994.