
НАВИГАЦИОННЫЕ
СИСТЕМЫ

УДК 629.7

**СОВРЕМЕННЫЕ ЗАДАЧИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
КООРДИНАТНО-ВРЕМЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГЛОНАСС
И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ИХ РЕШЕНИЯ.
1. СОВМЕЩЕНИЕ СИСТЕМ КООРДИНАТ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ
РАЗЛИЧНЫМИ ИНФОРМАЦИОННЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ
В ИНТЕРЕСАХ УТОЧНЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ГЕОЦЕНТРА**

© 2019 г. М. Н. Красильщиков^а, Д. М. Кружков^{а,*}, В. В. Пасынков^б

^а МАИ (национальный исследовательский ун-т), Москва, Россия

^б Акционерное общество “Научно-производственная корпорация “Системы прецизионного приборостроения”,
Москва, Россия

*e-mail: kruzchkovd@mail.ru

Поступила в редакцию 10.02.2019 г.

После доработки 21.02.2019 г.

Принята к публикации 25.03.2019 г.

Рассматривается задача совершенствования координатно-временного обеспечения ГЛОНАСС, в процессе решения которой возникает необходимость уточнения моделей широкого спектра случайных составляющих ошибок, вызванных неточным знанием геодезических и геодинамических параметров, таких, как положение и скорость смещения геоцентра, Всемирное время, смещения полюсов, неравномерность вращения Земли, прецессия и нутация. Показано, что решение задачи возможно лишь путем применения комплексной методики измерений, включающей использование различных информационных “техник” измерений, а именно: глобальных спутниковых систем, станций квантово-оптической связи, доплеровских измерителей скорости, радиоинтерферометров со сверхдлинной базой. Обсуждается возникающая при использовании данного подхода проблема совмещения систем координат, на которых базируется применение той или иной информационной технологии. Приводятся математические модели, алгоритмы и результаты их обработки в проведенных экспериментах по совмещению систем координат, используемых в глобальных навигационных спутниковых системах и станциями квантово-оптической связи. Приведенные результаты содержат оценки рассогласования различных систем координат, в том числе по положению центра, а также по различию масштабного коэффициента и ориентации относительно инерциальной системы координат.

DOI: 10.1134/S0002338819040085

Введение. Настоящая статья является первой из серии статей, посвященных проблемам совершенствования координатно-временного обеспечения ГЛОНАСС. На современном этапе развития глобальных навигационных систем, в том числе ГЛОНАСС, актуальна задача достижения дециметровой точности эфемерид навигационных космических аппаратов (НКА) в оперативном режиме решения навигационной задачи потребителя и сантиметровой – в апостериорном [1–4]. Иными словами, это означает, что для обеспечения конкурентоспособности ГЛОНАСС на мировом рынке соответствующих услуг ошибки эфемерид НКА ГЛОНАСС в оперативном режиме не должны превышать 20 см (на уровне среднеквадратического отклонения (СКО)) и 2 см в апостериорном (на уровне СКО). Предварительный анализ всей совокупности факторов, вносящих погрешность в навигационное решение, в том числе геодезических, геодинамических, а также случайных и систематических ошибок измерений, тропосферных и ионосферных задержек, ошибок моделирования движения НКА и т.д., показывает, что для достижения приведенных выше характеристик точности эфемерид НКА ошибки определения геодинамических параметров, в том числе Всемирного времени и координат полюса, непосредственно влияющих на точность эфемерид, а также геодезических, в том числе положения геоцентра, не должны превышать 1.5 см (на уровне СКО).

В силу неполной наблюдаемости геодинамических параметров в системе “НКА – наземная станция”, сформировать оценки этих параметров, используя только данные глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), в полном объеме не представляется возможным. Полностью наблюдаемыми могут стать только координаты полюса и длительность суток при условии известных Всемирного времени и параметров прецессии/нутаии. В свою очередь, оценка Всемирного времени на требуемом (1.5 см СКО, как указано выше) уровне точности может быть получена только по результатам обработки так называемых измерений РСДБ [5, 6]. Здесь аббревиатура РСДБ раскрывается как “радиоинтерферометр со сверхдлинной базой” – устройство, генерирующее временную задержку сигналов от внегалактических радиоисточников, принимаемых на пространственно разнесенную базу. Таким образом, оказывается, что наилучшая (1.5 см в линейной мере) точность оценок геодинамических параметров достигается только при совместной обработке измерений ГНСС и РСДБ. В результате, возникает дополнительная фундаментальная проблема совмещения систем координат (СК), используемых информационными технологиями формирования измерений ГНСС и РСДБ соответственно. Термин “совмещение систем координат” в данном контексте означает формализацию соотношений, позволяющих определить взаимно-однозначную зависимость координат любых объектов в совмещаемых системах координат с необходимой точностью, включая координаты станций, размещенных на Земле. Существующий в данной предметной области практический опыт [7] позволяет утверждать, что единственной информационной технологией, обеспечивающей требуемую (лучше 1 см на уровне СКО) точность знания положения координат станций в привязке к центру Земли, является лазерная дальнометрия, т.е. информационная технология, основанная на использовании измерений дальности с помощью квантово-оптических станций (КОС). С учетом сказанного оказывается, что в самом общем случае при решении задачи повышения точности эфемерид НКА ГЛОНАСС в соответствии с приведенными выше требованиями возникает также фундаментальная проблема совмещения систем координат, используемых информационными технологиями формирования измерений ГНСС и КОС соответственно.

Сложность и важность решения проблемы совмещения СК, формируемых различными информационными технологиями или, как принято говорить на профессиональном сленге, “техниками” (ГНСС, РСДБ, КОС), осознается специалистами, в том числе, и на международном уровне: сформулированная фундаментальная проблема признается одной из важнейших в проекте GGOS (Global geodetic observing system) [7]. Задачей этого проекта является коллокация (совмещение) всех существующих на сегодняшний день техник измерений.

Представляется очевидным, что необходимым условием решения сформулированной фундаментальной проблемы является создание пунктов, включающих расположенные в непосредственной близости измерительные станции, реализующие различные по своей природе измерения (ГНСС, РСДБ, КОС и ДОРИС (DORIS: Doppler orbitography and radiopositioning integrated by satellite) – одна из впервые созданных техник введения геоцентрических систем координат на основе обработки скоростных доплеровских измерений), а также создание колоцированного КА (в проекте GGOS планируется создание КА GRASP (Gravitational references for sensorimotor performance)), объединяющего в бортовом комплексе все четыре техники).

Интеграция данных различных техник на Земле позволяет определять в реальном времени расстояния между геодезическими маркерами средств различных информационных технологий, находящихся на видимом удалении друг от друга, и, тем самым, обеспечивать корреляционные связи для обработки данных различных средств в одном решении. Совмещение нескольких техник на борту дает возможность обрабатывать измерения всех имеющихся средств совместно, т.е. получать не только координаты станций, используя достоинства каждой техники. Так, например, РСДБ позволяет определять ориентацию и масштаб СК, КОС – положение геоцентра, ДОРИС – движение геоцентра, ГНСС обеспечивает лучшую относительную привязку координат станций и геодинамические параметры [5–7]. Иными словами, РСДБ дает лучшее Всемирное время, координаты Небесного полюса и параметры прецессии, ГНСС – координаты мгновенного полюса Земли.

В данной статье, которая является первой из серии статей, посвященных данной проблеме, описаны методы и алгоритмы, а также приведены результаты экспериментов по совмещению систем координат, используемых информационными технологиями ГНСС и КОС.

1. Математические модели и алгоритмы, разработанные в интересах совмещения СК. Остановимся более подробно на проблеме совмещения СК, в которых реализуются измерения различными информационными техниками. Как известно, эфемериды ГЛОНАСС ретранслируются в СК ПЗ-90 [1], а координаты наземных станций КОС заданы в ITRF (International terrestrial reference frame) [1]. В результате объективно существует различие между определениями этих СК.

Иными словами, оценки углов взаимной ориентации этих СК недостаточно для их совмещения СК, поскольку наблюдаются различия масштабного коэффициента каждой из перечисленных СК, а также различие в определении их начала (смещения нуля). Таким образом, совмещение СК А и Б друг с другом требует оценки всех параметров преобразования Гельмерта: смещение одной системы координат (три компоненты ΔX , ΔY , ΔZ линейного преобразования СК), ориентация одной системы координат относительно другой (три компоненты ω_x , ω_y , ω_z изменения ориентации СК) и масштабный коэффициент m [1]:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_B = (1 + m) \begin{pmatrix} 1 & +\omega_z & -\omega_y \\ -\omega_z & 1 & +\omega_x \\ +\omega_y & -\omega_x & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_A + \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix}. \quad (1.1)$$

Так как оценка параметров преобразования (1.1) для совмещения всех систем координат, которые используются каждой из обсуждаемых техник (РСДБ, КОС, ГНСС и ДОРИС), представляет собой отдельно взятую сложную научно-техническую проблему в силу наличия сопутствующих случайных факторов и неопределенностей, рассмотрим для начала задачу разработки алгоритмов совмещения и их экспериментальную отработку применительно к информационным технологиям КОС и ГНСС. Выбор КОС в качестве первого эксперимента обусловлен подготовленностью к такому эксперименту НКА ГЛОНАСС в силу их оснащенности соответствующим оборудованием.

Для оценки параметров преобразования (1.1) используются запросные измерения “НКА – наземная станция” и измерения КОС, модель которых включает:

- поправку на рефракцию сигнала в тропосфере,
- поправку на задержку в наземной аппаратуре КОС,
- релятивистскую поправку,

поправку на вынос оптических ретрорефлекторных антенных систем (ОРАС) (параметры выноса отражающих панелей КОС НКА относительно центра масс НКА) и задержку сигнала при переотражении внутри углового отражателя.

Обработка измерений проводилась с использованием “классического” метода наименьших квадратов (МНК) без учета априорной информации для регуляризации решения:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \Delta \vec{q} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \Delta \vec{h},$$

где \mathbf{A} – матрица частных производных (ЧП) от измеренной запросной дальности по уточняемым параметрам, \mathbf{P} – весовая матрица, $\Delta \vec{q}$ – вектор уточняемых параметров Гельмерта и выносов ОРАС относительно центра масс КА, $\Delta \vec{h}$ – вектор невязок измерений.

При совместной обработке измерений КОС с использованием апостериорных орбит ГНСС в интересах совмещения систем координат требуется вычисление матрицы наблюдаемости, состоящей из частных производных координат СК ГНСС по компонентам преобразования матрицы Гильмерта:

$$\begin{aligned} \frac{\partial X_B}{\partial m} &= X_A + \omega_z Y_A - \omega_y Z_A, & \frac{\partial X_B}{\partial \omega_x} &= 0, & \frac{\partial X_B}{\partial \omega_y} &= -(1 - m) Z_A, & \frac{\partial X_B}{\partial \omega_z} &= (1 - m) Y_A, \\ \frac{\partial X_B}{\partial \Delta X} &= 1, & \frac{\partial X_B}{\partial \Delta Y} &= 0, & \frac{\partial X_B}{\partial \Delta Z} &= 0, \\ \frac{\partial Y_B}{\partial m} &= Y_A - \omega_z X_A - \omega_x Z_A, & \frac{\partial Y_B}{\partial \omega_x} &= (1 - m) Z_A, & \frac{\partial Y_B}{\partial \omega_y} &= 0, & \frac{\partial Y_B}{\partial \omega_z} &= -(1 - m) X_A, \\ \frac{\partial Y_B}{\partial \Delta X} &= 0, & \frac{\partial Y_B}{\partial \Delta Y} &= 1, & \frac{\partial Y_B}{\partial \Delta Z} &= 0, \\ \frac{\partial Z_B}{\partial m} &= Z_A + \omega_y X_A - \omega_x Y_A, & \frac{\partial Z_B}{\partial \omega_x} &= -(1 - m) Y_A, & \frac{\partial Z_B}{\partial \omega_y} &= (1 - m) X_A, & \frac{\partial Z_B}{\partial \omega_z} &= 0, \\ \frac{\partial Z_B}{\partial \Delta X} &= 0, & \frac{\partial Z_B}{\partial \Delta Y} &= 0, & \frac{\partial Z_B}{\partial \Delta Z} &= 1. \end{aligned}$$

Измерения КОС включают широкий спектр случайных ошибок, большинство из которых поддается оценке существующими методиками и средствами. Однако наиболее важным неопре-

деленным фактором в эксперименте по совместной обработке измерений КОС с апостериорным орбитами ГНСС являются параметры выноса отражающих панелей КОС НКА (ОРАС) относительно центра масс НКА. В связи со сказанным, помимо представленных выше в соотношении (1.1) параметров преобразования, в оцениваемый вектор состояния входят параметры выноса $X_{св}, Y_{св}, Z_{св}$ в связанной с НКА СК для каждого объекта системы “НКА–станция КОС”.

В связи тем, что НКА системы ГЛОНАСС ориентированы на Солнце (теневые участки, где ориентация НКА ГЛОНАСС существенно отличается от номинальной, в обработку не брались), величина поправки к дальности КОС за счет выноса ОРАС относительно центра масс рассчитывается по формуле, получаемой из условия ориентации ОРАС на Землю и ориентации НКА на Солнце:

$$\Delta D_{\text{ОРАС}} = \frac{1}{|\vec{r}_{\text{АС}}|} (x_m / |\vec{r}_{\text{КА}}| \ d_m / |\vec{D}| \ c_m / |\vec{C}|) \times \vec{r}_{\text{АС}},$$

где $\vec{r}_{\text{АС}}$ – вектор центра ОРАС в связанной системе координат КА, $\vec{r}_{\text{КА}}$ – геоцентрический радиус-вектор КА, $\vec{C} = \vec{r}_{\text{КА}} \times \vec{r}_{\odot}$, \vec{r}_{\odot} – геоцентрический радиус-вектор Солнца в CRF (Celestial Reference Frame), $\vec{D} = \vec{C} \times \vec{r}_{\text{КА}}$, $x_m = \vec{r}_{\text{КА}} \times \vec{r}_{\text{АС}}$, $d_m = \vec{D} \times \vec{r}_{\text{АС}}$, $c_m = \vec{C} \times \vec{r}_{\text{АС}}$, $[\times]$, $[\cdot]$ – операторы векторного и скалярного произведения векторов соответственно.

Соотношения для расчета частных производных приведены ниже:

$$\frac{\partial \vec{r}_{\text{CRF}}}{\vec{r}_{\text{св}}} = \begin{pmatrix} \frac{x}{r} & \frac{y}{r} & \frac{z}{r} \\ \frac{d_x}{d} & \frac{d_y}{d} & \frac{d_z}{d} \\ \frac{c_x}{c} & \frac{c_y}{c} & \frac{c_z}{c} \end{pmatrix},$$

где x, y, z – соответственно компоненты, а r – значение (модуль) радиус-вектора $\vec{r}_{\text{КА}}$ в CRF, c_x, c_y, c_z – соответственно компоненты, а c – значение (модуль) вектора \vec{C} , d_x, d_y, d_z – соответственно компоненты, а d – значение (модуль) вектора \vec{D} .

2. Технология проведения экспериментов. Эксперименты по оценке выносов ОРАС проведены с использованием следующих исходных данных:

апостериорных эфемерид КА совместно с параметрами вращения Земли (ПВЗ) различных российских и международных центров анализа, сокращенно именуемых как pmk, cod, ias, esa, gfg; смысл перечисленных аббревиатур раскрывается ниже;

номинальных значений выносов ОРАС относительно центра масс КА ГЛОНАСС, опубликованных в ILRS (International laser ranging service);

финальных ПВЗ IERS (International Earth rotation service);

координат, скоростей и поправок к положению КОС сети ILRS из состава официальных данных ITRF-2008.

Модель динамических вариаций координат КОС в соответствии с рекомендациями IERS включала:

- прилив в твердом теле без учета постоянной части,
- океанический прилив,
- полярный прилив,
- атмосферную нагрузку.

Параметры трансформирования между СК (1.1) оценивались следующим образом:

на 30-суточных интервалах со смещением 1 сут (итого 30 реализаций на интервале эксперимента) с определением математического ожидания и СКО искомых параметров;

на всем 60-суточном интервале LARGE-1 (1.08.2014-30.09.2014).

В состав оцениваемых параметров включались:

вынос ОРАС по оси Ox связанной СК ($X_{св}$) ($Y_{св}, Z_{св}$ не включались по причине относительно низкой точности расчета и малого вклада возможной погрешности);

параметры преобразования Гельмерта, обеспечивающие переход между близкими прямоугольными системами координат (1.1), известные на текущий момент времени.

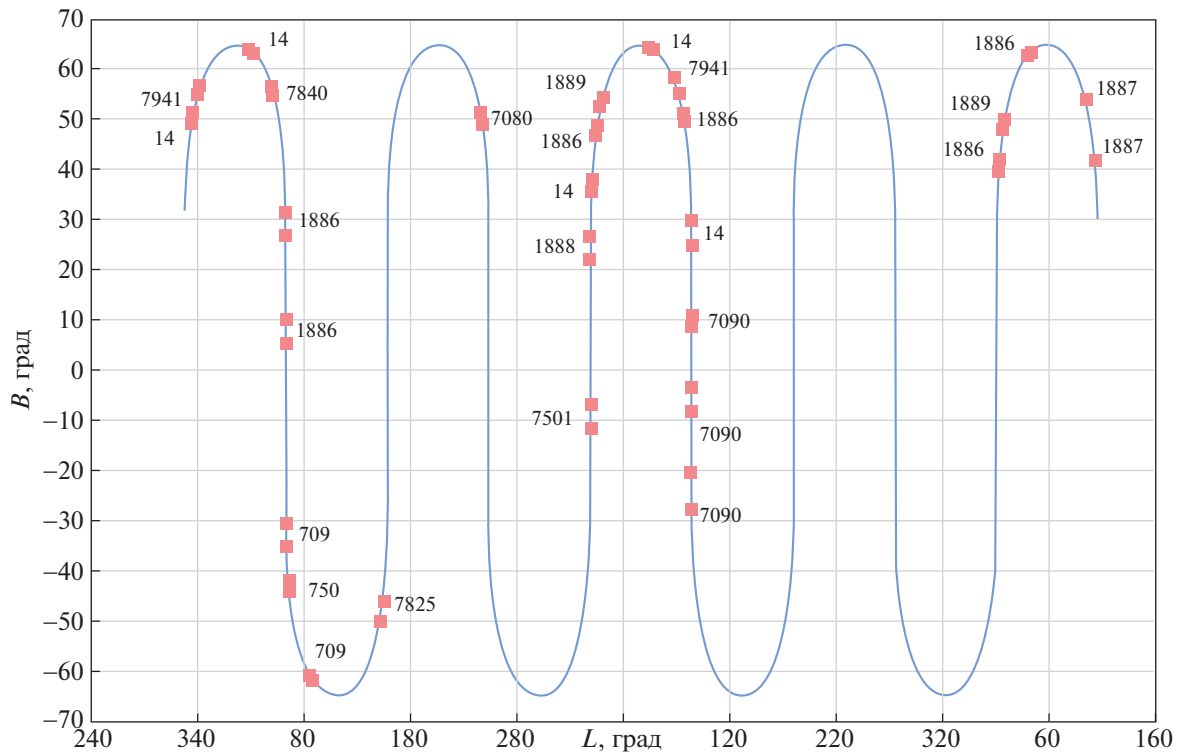


Рисунок. Типовое покрытие дуг орбит ГЛОНАСС лазерными измерениями

Для оценки параметров выноса ОРАС и параметров преобразования Гилмерта (1.1) была проведена серия реальных экспериментов по получению и совместной обработке методом наименьших квадратов измерений КОС и ГНСС. Каждая серия эксперимента включала в себя два этапа:

- 1) формирование максимального числа измерений,
- 2) обработка измерений с помощью апостериорной информации и уточнение параметров используемых моделей.

Все эксперименты были реализованы в рамках так называемого проекта “LARGE-1” [8] и были основаны на использовании инфраструктуры ILRS. С добавлением измерений этой глобальной сети при работе по всем 24 спутникам ГЛОНАСС в эксперименте LARGE-1 была решена задача достижения ранее недоступного объема высокоточных дальномерных лазерно-оптических измерений. В процессе проведения эксперимента и анализа объема полученных измерений эмпирически был выбран интервал обработки (аппроксимации) измерений. Исходя из 8-суточной кратности повторяемости трасс орбит ГЛОНАСС (более точно 17 витков с периодом 11 ч 15 мин), в качестве потенциальных интервалов аппроксимации были рассмотрены интервалы 8–10, 17–20, и 27–30 сут.

Анализ покрытия дуг орбит ГЛОНАСС измерениями показал, что, несмотря на усилия Международной лазерной сети по приоритетной работе станций по спутникам ГЛОНАСС, практически все дневные витки измерениями не покрыты, что было обусловлено двумя факторами: технической неоснащенностью большинства станций ILRS для работы в дневное время и неравномерностью распределения станций ILRS по поверхности Земли (большей концентрации станций в северном полушарии и большей плотностью в Европе и Северной Америке). Как следствие, типовая картина покрытия измерениями дуг орбит ГЛОНАСС представлена на рисунке. По оси абсцисс отражена долгота в градусах наземной трассы НКА, по оси ординат – широта, также в градусах. Цифрами на трассе обозначены номера соответствующих станций сети ILRS.

Исходя из анализа полученного объема измерений, был сделан вывод о невозможности построения орбит с точностью, сопоставимой с точностью, получаемой при обработке ГНСС измерений, когда обрабатываются измерения более 100 наземных станций с примерно одинаковым распределением станций по широте (в северном и южном полушариях) и по долготе (в во-

Таблица 1. Поправки (в см) к опубликованному (–184.6 см по продольной оси) значению выноса ОРАС, уточненные на интервале эксперимента LARGE-1 (для каждого центра первая строка – математическое ожидание, вторая – СКО)

АС	715	716	717	719	720	721	723	730	731	732	733	734
pmk	–8.5	–8.8	–9.8	–10.3	–9.6	–11.1	–12.6	–10.9	–9.0	–9.8	–8.4	–9.8
	0.6	0.3	0.6	0.4	0.3	0.2	0.7	0.4	0.5	0.4	0.3	0.4
cod	–5.7	–5.1	–5.9	–6.0	–6.0	–6.5	–7.0	–7.5	–5.9	–6.1	–5.3	–6.4
	0.7	0.4	0.6	0.2	0.2	0.7	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4
iac	–6.9	–5.5	–6.5	–7.7	–7.6	–8.1	–10.0	–8.2	–6.7	–8.0	–6.8	–7.2
	1.0	0.4	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4	0.8	0.7	0.7	0.6	0.8
esa	–8.9	–7.8	–7.8	–8.4	–7.7	–7.9	–9.3	–10.6	–7.6	–8.0	–7.0	–8.1
	0.5	0.3	0.5	0.3	0.3	0.4	0.6	0.7	0.5	0.5	0.3	0.5
АС	735	736	737	738	742	743	744	745	746	747	754	755
pmk	–8.9	–6.9	–11.2	–9.0	–9.7	–10.3	–8.8	–10.0	–9.7	–9.8	–9.8	–6.5
	0.4	0.6	0.4	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2
cod	–5.0	–5.1	–5.9	–5.0	–6.0	–6.7	–6.1	–6.7	–6.1	–6.6	–6.9	–2.5
	0.2	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2
iac	–6.7	–2.2	–8.2	–6.2	–6.9	–7.9	–6.8	–8.4	–7.4	–8.1	–7.6	–3.5
	0.5	1.1	0.4	0.5	0.6	0.7	0.7	0.6	0.4	0.6	0.7	0.3
esa	–6.8	–7.6	–7.6	–8.1	–7.8	–8.6	–7.5	–8.0	–8.0	–8.0	–8.3	–4.3
	0.3	0.4	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3

сточном и западном полушариях), а также обеспечивается 100%-ное покрытие дуг орбит вне зависимости от освещенности КА и местного времени.

Иными словами, исходя из объема полученных измерений, одновременное уточнение орбит ГЛОНАСС и параметров выноса ОРАС относительно центра масс оказалось нереализуемым.

В этих условиях была сформирована методическая схема уточнения параметров выноса ОРАС относительно центра масс по лазерным измерениям с привлечением орбит, определенных с использованием измерений ГНСС, т.е. орбиты НКА ГЛОНАСС по лазерно-оптическим измерениям не определялись.

Для уточнения параметров выноса ОРАС относительно центра масс по лазерным измерениям в задаче был реализован расчет частных производных от дальности по параметрам выноса в связанной системе координат КА с помощью соотношений (1.6).

Обработка полученных измерений проводилась с использованием апостериорных эфемерид центров анализа: pmk, cod, iac, esa (см. ниже) и исходных данных, приведенных ранее. В табл. 1 представлены значения поправок к формулярным выносам по оси $X_{св}$ для каждого КА системы ГЛОНАСС для 30-суточных решений.

Анализ данных табл. 1 показывает, что при использовании апостериорных эфемерид следующих центров анализа (Analytical Center, (АС)) наблюдаются поправки:

СВОЭВП (система высокоточного определения эфемеридно-временных поправок, pmk) – к опубликованному выносу от –12.6 до –6.5 см (размах 6.0 см) со средним значением –9.5 см;

CODE (Center for orbit determination in Europe, cod) – к опубликованному выносу от –7.5 до –2.5 см (с минимальным размахом 5.0 см) со средним значением –5.9 см;

ИАЦ КВНО ЦНИИмаш (iac) – к опубликованному выносу от –10.0 до –2.2 см (с максимальным размахом 7.9 см) со средним значением –7.0 см;

Европейского космического агентства (esa) – промежуточные значения поправок к формулярным значениям от –10.6 до –4.3 см (размах 6.2 см) со средним значением –7.9 см.

Для выяснения причин наблюдаемых отличий между эфемеридами различных центров было проведено оценивание параметров трансформирования Гельмерта (1.1) для СК, передаваемой эфемеридами СВОЭВП и эфемеридами других АС.

Таблица 2. Параметры трансформирования Гельмерта для СК, передаваемых апостериорными СВОЭВП (pmk) и эфемеридами альтернативных АС

АС	Показатель	ΔX	ΔY	ΔZ	ω_x	ω_y	ω_z	m , ppb
		см			mas			
cod	МО	0.2	-0.2	-1.1	0	0	0	1.03
	СКО	0.1	0.1	0.6	0	0	0	0.05
esa	МО	0.2	0.0	0.6	0	0	0	0.65
	СКО	0.1	0.1	0.5	0	1	0	0.04
gfz	МО	0.3	0.0	2.1	0	0	0	0.81
	СКО	0.1	0.0	0.5	0	1	0	0.04
iac	МО	0.0	-0.1	0.2	0	0	0	0.55
	СКО	0.1	0.1	0.4	0	0	0	0.08

Таблица 3. Параметры трансформирования Гельмерта для СК, зафиксированных координатами КОС и передаваемых апостериорными эфемеридами центров анализа

АС	Показатель	ΔX	ΔY	ΔZ	ω_x	ω_y	ω_z	M , ppb
		см			mas			
pmk	МО	0.5	-0.4	-1.9	-0.3	0.0	0.0	2.4
	СКО	0.1	0.1	0.2	0.1	0.0	0.0	0.6
cod	МО	0.1	-0.3	-1.6	-0.4	0.0	0.0	1.1
	СКО	0.2	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.6
iac	МО	0.4	-0.5	-1.8	-0.3	0.0	0.0	2.3
	СКО	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	1.1
esa	МО	0.2	-0.3	-1.6	-0.3	0.0	0.0	2.1
	СКО	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.6

В табл. 2 приведены результаты расчета параметров преобразования Гельмерта между эфемеридами pmk и cod, iac, esa, здесь добавлен АС GFZ German research centre for geosciences (gfz), который также публикует данные по ГЛОНАСС.

Анализ результатов табл. 2 показал, что СК, передаваемые эфемеридами различными АС, практически не имеют смещения начала отсчета и не развернуты друг относительно друга, однако масштабные коэффициенты существенно отличаются.

Масштабный коэффициент для эфемерид определяется орбитой навигационного КА, точнее, значением ее большой полуоси и не зависит от смещения начала отсчета. Большая полуось орбит КА ГЛОНАСС имеет среднее значение 25510 км. Умножая масштабный коэффициент на значение большой полуоси, получаем:

- cod – 2.6 см,
- iac – 1.4 см,
- esa – 1.6 см,
- gfz – 2.1 см.

В табл. 3 приведены результаты расчета параметров преобразования Гельмерта для СК, зафиксированных координатами КОС и передаваемых апостериорными эфемеридами АС. Представлены оценки на 30-суточных интервалах со смещением 1 сут (итого 30 реализаций на интервале эксперимента) с определением математического ожидания и СКО искоемых параметров на интервале проведенных измерений в рамках эксперимента LARGE-1.

Анализ данных табл. 3 показывает, что между СК наблюдается смещение на величину от -1.9 до -1.6 см по оси O_z , что может быть удовлетворительно объяснено большей концентрацией КОС в Северном полушарии (смещение по O_z). Также присутствует разворот СК относительно оси O_x на величину -0.3 mas (milliarsseconds, угловых миллисекунд), интерпретация которого

может быть связана с относительным разворотом СК, формируемой техниками ГНСС и КОС. Также наблюдается масштабный коэффициент, зависящий от используемых орбит ГНСС различных АС и равный:

- pmk – 2.4 ppb (6.1 см),
- cod – 0.9 ppb (2.3 см),
- ias – 2.3 ppb (5.9 см),
- esa – 2.1 ppb (5.4 см),

где ppb – parts per billion, отражающий смещение в метрах между СК для вектора длиной 10^9 м.

Сравнение масштабных коэффициентов табл. 2 и 3 между собой, а также сравнение отличий выносов ОРАС, полученных с помощью орбит ГНСС различных АС, показывает, что наблюдаемые отличия в уточненных значениях выносов вполне объясняются различиями моделей, используемых при определении орбит ГНСС различными АС.

Для выяснения причин полученной (см. табл. 1–3) систематической погрешности в выносах уголкового отражателя при проведении расчетов поправки на вынос была реализована более точная формула отражения:

$$\vec{R}_f = \vec{R}_c - h\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_x} \begin{pmatrix} \cos \theta_x \\ \cos \theta_y \\ \cos \theta_z \end{pmatrix},$$

где \vec{R}_c – вектор на точку, указанную в формуляре из центра масс КА, \vec{R}_f – вектор на фазовый центр.

Угол падения θ_x света на плоскость ретрорефлекторной системы (РС), по сути является углом между падающим лучом и осью Ox , направленной вдоль линии на центр Земли. Угол падения может быть вычислен при известном зенитном угле ζ :

$$\sin \theta_x = \frac{R_3 \sin \zeta}{R_3 + H},$$

где H – высота орбиты, R_3 – радиус Земли.

Азимут лазерного луча в системе координат КА на момент измерения дальности определяется углом θ_y между лучом и осью координат y , лежащей в плоскости РС и направленной на Солнце. Зная координаты КА и положение Солнца, рассчитываем направляющие косинусы лазерного луча в системе координат РС, т.е. углы θ_x , θ_y , θ_z .

В НКА “Глонасс-М” и “Глонасс-К” используются уголкового отражатели (УО) одинакового размера. Основными параметрами в данном случае являются h – высота УО, 19.1 мм; n – групповой показатель преломления, равный 1.485.

С учетом этой редукции измерения были обработаны заново.

В табл. 4 приведены значение поправок к формулярным выносам по оси $X_{св}$ для каждого КА системы ГЛОНАСС для 30-суточных решений с учетом редукции приведенным формулам.

Анализ данных табл. 4 показывает, что при использовании внесенной редукции для различных АС наблюдаются:

pmk – максимальные поправки к формулярным значениям от –5.0 до –0.3 см (размах 4.6 см) со средним значением –2.9 см,

cod – минимальные поправки к формулярным значениям от –1.0 до +2.1 см (с минимальным размахом 3.1 см) со средним значением +0.8 см,

ias – промежуточные значения поправок к формулярным значениям от –2.4 до +4.3 см (с максимальным размахом 6.7 см, который уменьшился на 18%) с минимальным средним значением отклонения –0.4 см,

esa – промежуточные значения поправок к формулярным значениям от –4.1 до +0.4 см (размах 4.5 см) со средним значением –1.3 см.

Таким образом, качественного улучшения оценок не произошло; произошло лишь смещение на величину порядка 4.3 см со знаком минус, так что данные тех центров, которые анализировали орбиты с большими положительными значениями отклонений, определенные по данным радиотехнических измерений, оказались более согласованными с результатами лазерных наблюдений.

Таблица 4. Поправки (в см) к формулярным значениям выносов ОПАС, уточненные на интервале эксперимента LARGE-1 (для каждого центра первая строка – математическое ожидание, вторая – значение СКО)

АС	715	716	717	719	720	721	723	730	731	732	733	734
pmk	-1.3	-2.2	-3.0	-3.7	-3.1	-4.4	-5.0	-4.4	-2.3	-2.0	-1.0	-3.2
	0.6	0.3	0.6	0.4	0.3	0.2	0.7	0.4	0.5	0.4	0.3	0.4
cod	1.6	1.5	0.9	0.6	0.5	0.2	0.6	-1.0	0.7	1.8	2.1	0.1
	0.7	0.4	0.6	0.2	0.2	0.7	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4
iac	0.3	1.0	0.3	-1.1	-1.2	-1.4	-2.4	-1.7	-0.1	-0.1	0.6	-0.6
	1.0	0.4	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4	0.8	0.7	0.7	0.6	0.8
esa	-1.7	-1.3	-1.0	-1.8	-1.2	-1.2	-1.7	-4.1	-1.0	-0.2	0.4	-1.5
	0.5	0.3	0.5	0.3	0.3	0.4	0.6	0.7	0.5	0.5	0.3	0.4
АС	735	736	737	738	742	743	744	745	746	747	754	755
pmk	-2.3	-0.3	-4.6	-2.4	-3.2	-3.8	-2.2	-3.5	-3.2	-3.1	-2.1	-3.7
	0.4	0.6	0.4	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2
cod	1.6	1.5	0.7	1.6	0.5	-0.2	0.4	-0.1	0.4	0.2	0.9	0.3
	0.2	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2
iac	-0.1	4.3	-1.7	0.4	-0.4	-1.4	-0.2	-1.9	-0.9	-1.3	0.1	-0.8
	0.5	1.1	0.4	0.5	0.6	0.7	0.7	0.6	0.4	0.6	0.7	0.3
esa	-0.2	-1.1	-1.0	-1.5	-1.3	-2.1	-0.9	-1.5	-1.5	-1.2	-0.6	-1.6
	0.3	0.4	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3

Таблица 5. Параметры трансформирования Гельмерта для СК, зафиксированных координатами КОС и передаваемых апостериорными эфемеридами центров анализа

АС	Показатель	ΔX	ΔY	ΔZ	ω_X	ω_Y	ω_Z	M , ppb
		см			mas			
pmk	МО	1.0	-0.4	-3.0	-0.3	0.0	0.0	2.4
	СКО	0.1	0.1	0.2	0.1	0.0	0.0	0.6
cod	МО	0.1	-0.3	-1.6	-0.4	0.0	0.0	1.1
	СКО	0.2	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.6
iac	МО	0.4	-0.5	-1.8	-0.3	0.0	0.0	2.3
	СКО	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	1.1
esa	МО	0.2	-0.3	-1.6	-0.3	0.0	0.0	2.1
	СКО	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.6

В табл. 5 приведены результаты расчета параметров преобразования Гельмерта для СК, зафиксированных координатами КОС и передаваемых апостериорными эфемеридами АС с учетом редуцированной поправки.

Анализ данных табл. 5 показывает, что в результате внесения редуцированной поправки значения линейных смещений и разворотов системы координат КОС относительно апостериорных эфемерид всех центров анализа не изменились.

Более того, масштабный коэффициент для всех центров анализа даже несколько увеличился:

pmk – 2.4 ppb (1.5 см),

cod – 0.9 ppb (0.7 см),

iac – 2.3 ppb (1.5 см),

esa – 2.1 ppb (1.2 см),

что свидетельствует об ухудшении точности согласования апостериорных орбит с лазерными измерениями.

Отличия средних формулярных значений выноса фазового центра антенн от значений, приведенных в документации по КА серии ГЛОНАСС-М, в связанной СК (ΔX_{cb}) хорошо коррелируют с уточненными значениями, которые, скорее всего, обусловлены выработкой топлива в результате коррекции орбиты после выведения и постановки НКА в системную точку.

Заключение. В статье предложен подход к решению проблемы повышения точности эфемерид ГЛОНАСС до уровня, обеспечивающего конкурентоспособность этой системы на мировом рынке соответствующих услуг. Подход основан на совместном использовании техник ГНСС, КОС, РСДБ и ДОРИС с целью дальнейшей обработки измерений, генерируемых перечисленными техниками. Показано, что необходимым условием для реализации предлагаемого подхода является процедура совмещения систем координат с помощью представленных техник.

Продемонстрирована возможность такого совмещения на примере совместного использования техник ГНСС и КОС. Приведены результаты эксперимента по совмещению ГНСС и КОС с целью оценки выноса ОРАС в интересах повышения точности определения положения геоцентра. Показано, что в результатах эксперимента по совмещению присутствуют ошибки совмещаемых ГНСС по ориентации и масштабному коэффициенту, которые не поддаются однозначной интерпретации в рамках принятых моделей измерений и требуют привлечения техники РСДБ для выявления причин наблюдаемого рассогласования.

В следующей статье, посвященной решению фундаментальной проблемы повышения точности оперативных эфемерид ГЛОНАСС, будут приведены результаты совмещения систем координат применительно к информационным техникам ГНСС и РСДБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бартенев В.А., Гречкосеев А.К., Козорез Д.А., Красильщиков М.Н., Пасынков В.В., Себряков Г.Г., Сыпало К.И.* Современные и перспективные информационные ГНСС-технологии в задачах высокоточной навигации. М.: Физматлит, 2014. 191 с.
2. *Пасынков В.В., Брагинцев В.Ф., Жуков А.Н., Зотов С.М., Коробкин В.А., Суевалов В.В., Титов Е.В., Хомяк Р.В.* Решение проблемы точности системы ГЛОНАСС и перспективы ее улучшения в ближайшие годы // Тр. ИПА РАН. 2015. Вып. 35. С. 17–23.
3. *Пасынков В.В., Бакитько Р.В., Гулидов Д.В., Иванов Д.В., Ипатов А.В., Косенко В.Е., Суевалов В.В., Суркис И.Ф., Титов Е.В., Шебшаевич Б.В., Широкий С.М.* Использование узлов колокации для повышения точности системы ГЛОНАСС // Сб. тез. докл. 7-й Всероссийск. конф. “Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение” (КВНО-2017). СПб.: ИПА РАН, 2017.
4. Модернизация МЛНСС на соответствие требованиям, предъявляемым к КА “Глонасс-К” с улучшенными характеристиками. Пояснительная записка. ОКР “ГЛОНАСС-КК-В”. М.: ОАО “НПК “СПП”, 2013.
5. *Ипатов А.В.* Российские РСДБ-системы для астрометрии и геодинамики // Всероссийская радиоастрометрическая конф. Пушино, 2014. 54 с.
6. *Пасынков В.В., Данилюк А.Ю., Забокрицкий А.В.* Эфемеридно-временное обеспечение ГНС ГЛОНАСС // Тр. ИПА РАН. 2009. Вып. 20. С. 90–103.
7. NASA's Geodetic Networks: Incubators of Innovation. Earth Science Subcommittee of the NASA Advisory Council. Washington, 2012. 38 p.
8. Анализ результатов LARGE-1 с точки зрения колокации бортовых устройств GNSS и КОС на КА ГЛОНАСС // 20th International Workshop on Laser ranging. Potsdam, 2016. 7 p.