
НАВИГАЦИОННЫЕ
СИСТЕМЫ

УДК 629.7

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

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

^аМАИ (национальный исследовательский ун-т), Москва, Россия

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

*e-mail: kruzchkovd@mail.ru

Поступила в редакцию 10.03.2019 г.

После доработки 16.04.2019 г.

Принята к публикации 20.05.2019 г.

Рассматривается задача дальнейшего совершенствования координатно-временного обеспечения ГЛОНАСС, в процессе решения которой возникает необходимость уточнения моделей широкого спектра ошибок, вызванных неточным знанием геодезических и геодинамических параметров. Поскольку, как было показано в предыдущей статье авторов, решение подобной задачи возможно лишь путем обработки навигационных измерений, использующих различные информационные технологии, обсуждается возникающая для данного подхода проблема совмещения систем координат, на которых базируется применение той или иной технологии. Приводятся результаты экспериментов по совмещению систем координат, используемых глобальными навигационными спутниковыми системами и радиointерферометрами со сверхдлинными базами, содержащие оценки рассогласования измерений, генерируемых различными информационными технологиями.

DOI: 10.1134/S0002338819050081

Введение. Настоящая статья продолжает [1], т.е. является второй из серии статей, посвященных проблеме совершенствования координатно-временного обеспечения ГЛОНАСС. Ранее в [1] указывалось, что 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 [2–5]. Был сделан вывод [1] о необходимости достижения требуемого уровня точности эфемерид НКА ГЛОНАСС путем устранения ошибок в оценках 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. Проведенный анализ перечисленных факторов и их вклада в конечную ошибку навигационного решения показал [1], 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 среднеквадратического отклонения (СКО)). В силу неполной наблюдаемости геодинамических параметров в системе “НКА–наземная станция” был сделан вывод о необходимости формирования оценок перечисленных параметров с использованием разнородных навигационных данных, получаемых из различных информационно-измерительных систем. Иными словами, в обработке должны участвовать не только измерения глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), но также и измерения радиointерферометров со сверхдлинной базой (РСДБ) [5, 6] и лазерные измерения,

получаемые с привлечением квантово-оптических систем (КОС). При совместной обработке подобного состава измерений возникает самостоятельная фундаментальная научно-техническая проблема совмещения систем координат (СК), используемых различными информационными технологиями формирования измерений, т.е. ГНСС, РСДБ и КОС. Под “совмещением” систем координат понимается оценка параметров, позволяющих определить взаимно однозначную зависимость координат любых объектов в совмещаемых системах координат с необходимой точностью, включая координаты станций, размещенных на Земле, т.е. параметров преобразования Гельмерта [1]: трех углов ориентации, масштабного коэффициента и трех компонент вектора — смещения нуля СК. Таким образом, для решения поставленной задачи повышения точности эфемерид НКА ГЛОНАСС с использованием всех доступных на сегодняшний день информационных технологий (техник) получения и совместной обработки измерений различной физической природы требуется оценить семь параметров совмещения для каждой из систем координат, в которой работают перечисленные выше системы (ГНСС, РСДБ и КОС).

Первым шагом на пути решения поставленной задачи [1] было совмещение СК ГНСС и КОС. Такой выбор обусловлен наличием на борту НКА ГЛОНАСС ретрорефлекторных отражателей, обеспечивающих возможность проведения соответствующих сеансов измерений КОС без каких-то дополнительных вмешательств в штатную работу НКА ГЛОНАСС и наземных станций. В [1] были приведены результаты множественных экспериментов, в том числе LARGE-1, позволившие выполнить оценку взаимной ориентации, разности масштабного коэффициента и смещения нуля рассматриваемых систем координат. Одновременно в качестве необходимой меры были проведены оценки выносов оптических ретрорефлекторных антенных систем относительно центра масс НКА ГЛОНАСС. В целом результаты показали наличие неопределенности в генерируемых оценках параметров совмещения систем координат, сформированных в результате обработки измерений, предоставляемых разными центрами анализа эфемерид ГНСС. Был сделан вывод о необходимости дальнейшего совместного использования различных информационных технологий при получении и обработке измерений в интересах повышения точности эфемерид НКА ГЛОНАСС. Таким образом, в настоящей статье, которая, как уже указывалось, является второй из серии статей, посвященных описанной выше проблеме, рассматриваются результаты проведенных экспериментов по объединению на базе НКА ГЛОНАСС уже трех типов измерений, генерируемых с использованием ГНСС, КОС и РСДБ. Четвертую из известных координатных техник ДОРИС (DORIS: Doppler orbitography and radiopositioning integrated by satellite) или ее аналогов для средневысотных орбит, какими являются орбиты НКА ГНСС, использовать в данном контексте нецелесообразно в силу недостаточной точности актуальных измерений, генерируемых этой системой.

1. Частные задачи, возникшие при попытке провести совместную обработку ГНСС- и РСДБ-измерений. Остановимся более подробно на проблеме совмещения СК, в которых реализуются измерения различными информационными техниками. Как уже подробно было описано в [1], основной задачей разрабатываемых алгоритмов и проведенных экспериментов являлась оценка всех параметров преобразования Гельмерта между различными реализациями связанной с Землей системами координат: смещение СК (три компоненты $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$), ориентация одной СК относительно другой (три компоненты $\omega_x, \omega_y, \omega_z$) и масштабный коэффициент m . В [1] представлены необходимые частные производные для использования в методе наименьших квадратов при обработке измерений ГНСС и КОС. Аналогичные параметры подлежат оценке при совмещении систем координат ГНСС и РСДБ, выполняемой с целью одновременной обработки измерений различной физической природы. Однако, как показал предварительный анализ результатов обработки измерений, получаемых станциями РСДБ по сигналам НКА ГЛОНАСС, возникают дополнительные проблемы, препятствующие высокоточной оценке параметров преобразования Гельмерта. Эти проблемы обусловлены необходимостью:

выбора сигнала (сигналов) ГНСС, использование которого является наиболее эффективным при обработке РСДБ-измерений в интересах достижения максимальной точности получаемых оценок;

повышения точности интерпретации задержки распространения сигнала при “работе” РСДБ по НКА ГЛОНАСС с точки зрения учета влияния тропосферной и ионосферной рефракции и релятивистских эффектов;

повышения точности корреляционной обработки результатов измерений на программном корреляторе Института прикладной астрономии Российской академии наук (ИПА РАН) и математической интерпретации РСДБ-задержки при “работе” по НКА ГЛОНАСС с точки зрения учета влияния ошибок навигационного сигнала ГЛОНАСС.

2. Выбор сигнала ГНСС для проведения измерений с использованием сети наземных станций РСДБ. Как уже было сказано ранее, прежде чем начать совместную обработку измерений и проводить попытки совмещения СК ГНСС и РСДБ, необходимо было определить сигнал ГНСС, с использованием которого целесообразно проводить измерения. Как известно, в настоящий момент НКА ГЛОНАСС излучают в трех частотных диапазонах: L1, L2 и L3. Кроме того, бортовое оборудование НКА ГЛОНАСС позволяет работать в еще одном частотном диапазоне, предназначенном для проведения межспутниковых измерений на частоте ~ 2 ГГц. Определить приемлемый частотный диапазон было решено путем пробных экспериментов по использованию наземных станций РСДБ по сигналам НКА ГЛОНАСС в начале 2017 г. Параллельно с работой станций РСДБ по ГНСС проводились многочасовые ежесуточные сессии по внегалактическим радиоисточникам в интересах оперативного определения поправки Всемирного времени, которая была необходима для увеличения точности при обработке ГНСС-измерений.

Как уже указывалось выше, корреляционная обработка измерений проводилась на корреляторе Центра корреляционной обработки ИПА РАН. Результаты корреляционной обработки показали принципиальную возможность работы станций РСДБ по сигналам ГНСС.

Модель так называемой РСДБ-задержки при работе станций по ГНСС представляется в виде соотношения

$$\tau_{1,2} = \frac{D_1^i(t', t_1) - D_2^i(t', t_2)}{c}, \quad (2.1)$$

где $\tau_{1,2}$ – групповая геометрическая задержка сигнала между станциями РСДБ, t' – время отправки сигнала i -м КА, t_1 и t_2 – время приема сигнала первой и второй станциями РСДБ соответственно, c – скорость света, D_1^i и D_2^i – расстояния, пройденные сигналом i -го КА до первой и второй станции РСДБ соответственно:

$$D_1^i(t', t_1) = \left| \vec{r}_{\text{НКА}}^i(t') - \vec{r}_1^i(t_1) \right|,$$

$$D_2^i(t', t_2) = \left| \vec{r}_{\text{НКА}}^i(t') - \vec{r}_2^i(t_2) \right|,$$

где $\vec{r}_{\text{НКА}}^i$ – радиус-вектор i -го НКА в момент излучения сигнала t' в инерциальной CRF, $\vec{r}_1^i(t_1)$ и $\vec{r}_2^i(t_2)$ – координаты первой и второй станций в CRF в моменты приема сигнала i -го НКА t_1 и t_2 соответственно. Из приведенных зависимостей очевидно, что измеренное значение для РСДБ-задержки содержит поправку, обусловленную разностью показаний часов первой и второй станций, которую следует включать в состав уточняемых параметров при решении различных задач оценивания.

В таблице приведены значения групповой геометрической задержки (τ), полученные в результате обработки измерений РСДБ, которая в данном контексте интерпретируется как задержка сигналов, вызванная их распространением до приемника без учета влияния ионосферы и тропосферы. BDSV, SVZC и ZCBD – коды наземных станций РСДБ, расположенных на территории России. Данные корреляционной обработки, приведенные в таблице, предварительные и поэтому содержат отдельные выбросы измерений и ошибки привязки измерений к шкале всемирного координированного времени. Полученные в результате обработки измерений оценки шумовой ошибки задержки τ показали СКО на уровне 1–2 нс. Пример невязок групповых геометрических задержек РСДБ-измерений приведен на рис. 1.

В результате анализа полученных результатов было доработано программно-математическое обеспечение (ПМО), используемое для оценки РСДБ-задержки (2.1) при работе по космическим аппаратам. Кроме того, по результатам первого эксперимента установлено, что в качестве основного диапазона частот необходимо использовать L1. В конечном счете, совершенствование методики проведения РСДБ-измерений, процедуры корреляционной обработки и оценки точностных характеристик измерений потребовало проведения дополнительных сеансов с последующей обработкой их результатов с использованием программного коррелятора ИПА РАН.

3. Улучшение точности интерпретации РСДБ-задержки при работе по НКА ГЛОНАСС с точки зрения учета влияния тропосферной и ионосферной рефракции. Как уже указывалось выше, для улучшения точности обработки измерений с точки зрения учета влияния задержки сигнала в атмосфере был проведен еще один эксперимент, состоявший в получении станциями РСДБ-измерений по нескольким НКА ГЛОНАСС с использованием сигналов в частотном диапазоне

Таблица. Значения групповой геометрической задержки (τ), полученные из обработки наблюдений РСДБ

База	Время (год, номер суток, часы, минуты, секунды UTC)	SNR	τ , нс
BDSV	2017.019.02:01:11	560.4	-2268322.327
BDSV	2017.019.02:02:11	405.7	-2278177.315
BDSV	2017.019.02:03:11	275.4	-2287299.989
BDSV	2017.019.02:04:11	641.5	-2295862.448
BDSV	2017.019.02:05:11	483.0	-2303759.066
BDSV	2017.019.02:06:11	414.9	-2310978.122
BDSV	2017.019.02:07:11	236.0	-2317507.710
BDSV	2017.019.02:08:11	347.9	-2323328.936
BDSV	2017.019.02:09:11	304.9	-2328440.859
BDSV	2017.019.02:10:11	227.1	-2332817.902
BDSV	2017.019.02:11:11	102.2	-2336453.516
BDSV	2017.019.03:01:11	323.1	-1356166.672
BDSV	2017.019.03:02:11	261.7	-1310381.835
BDSV	2017.019.03:03:11	347.1	-1263520.680
BDSV	2017.019.03:04:11	241.6	-1215586.638
BDSV	2017.019.03:11:11	221.4	-850207.014
BDSV	2017.019.03:14:11	220.4	-677823.620
SVZC	2017.019.05:00:31	452.8	2287641.622
ZCBD	2017.019.02:12:10	346.7	6150282.609
ZCBD	2017.019.02:13:10	243.9	6097593.245
ZCBD	2017.019.02:14:07	15.3	6046491.657
ZCBD	2017.019.02:14:10	213.5	6043773.382
ZCBD	2017.019.03:05:10	361.8	1854556.079
ZCBD	2017.019.03:06:10	261.5	1747209.111
ZCBD	2017.019.03:07:10	246.2	1639093.733
ZCBD	2017.019.03:08:10	273.1	1530221.383
ZCBD	2017.019.03:09:10	349.4	1420604.757
ZCBD	2017.019.03:10:10	319.0	1310259.967
ZCBD	2017.019.03:12:10	255.2	1087448.988
ZCBD	2017.019.03:13:07	193.1	980653.536
ZCBD	2017.019.03:13:10	422.9	975016.397
ZCBD	2017.019.05:01:10	705.8	-11338845.930
ZCBD	2017.019.05:02:10	406.3	-11421504.374
ZCBD	2017.019.05:03:10	441.3	-11503114.514
ZCBD	2017.019.05:04:10	511.1	-11583664.466
ZCBD	2017.019.05:05:10	245.3	-11663150.786
ZCBD	2017.019.05:09:10	281.8	-11970296.478
ZCBD	2017.019.05:12:10	123.4	-12189119.753
ZCBD	2017.019.05:13:10	173.6	-12259831.971
ZCBD	2017.019.05:14:10	124.1	-2329414.899

1.6 МГц и с учетом ограничений вследствие фактической радиовидимости НКА и текущей загрузки станций РСДБ по международным и российским программам.

Для интерпретации тропосферной погрешности как групповой и фазовой РСДБ-задержки, т.е. сдвига фазы принимаемого сигнала на частоте L1 вследствие прохождения через тропосферу при работе по НКА ГЛОНАСС, применялись:

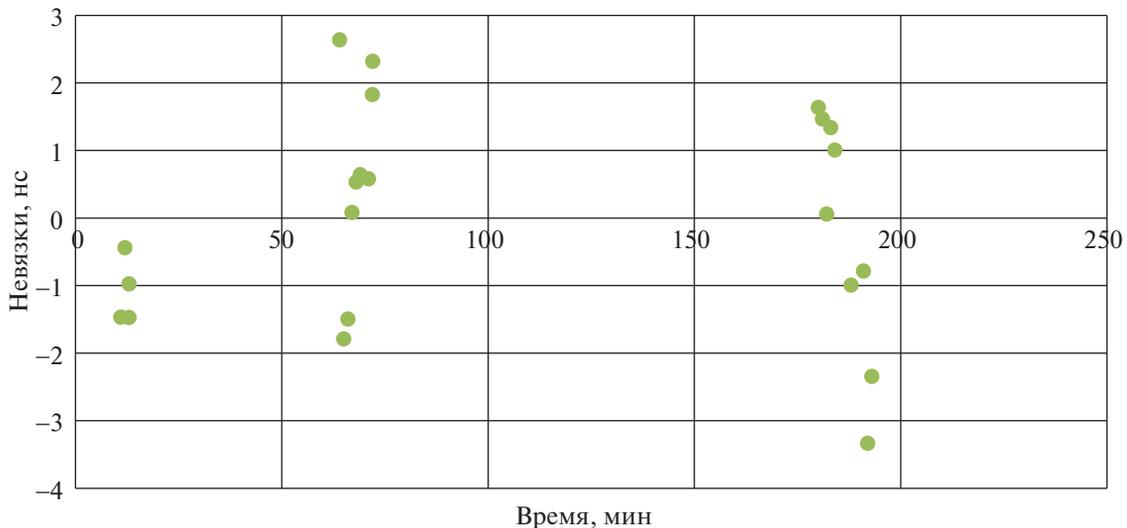


Рис. 1. Невязки групповых задержек сигналов НКА на станциях РСДБ

измерения радиометра водяного пара, преобразованные в так называемую влажную [7] задержку, обусловленную наличием следов водяного пара в атмосфере;

результаты уточнения влажной задержки по ГНСС-измерениям;

результаты уточнения влажной задержки по РСДБ-измерениям при работе по внегалактическим радиоисточникам.

Для интерпретации ионосферной погрешности РСДБ-задержки по НКА ГЛОНАСС были использованы:

двухчастотные измерения ГНСС-приемников с предварительной калибровкой их бортовой шкалы, взаимного расположения на поверхности Земли и других априорных настроек относительно эталонного приемника,

апостериорные ионосферные карты [8], формируемые центром анализа ГНСС,

ионосферная модель, передаваемая в кадре сигнала L3 НКА “ГЛОНАСС-К”.

Анализ результатов, полученных в процессе выполнения описанного выше эксперимента, позволил доработать ПМО интерпретации измерений с точки зрения учета влияния тропосферной и ионосферной рефракции различными способами. Однако ошибки невязок измерений, получаемых соответственно техниками РСДБ и ГНСС, были по-прежнему велики и достигали 20 см (СКО) как результат квадратичного тренда при потенциальной точности навигационной функции на уровне 1 см (СКО), что следует из приращений навигационной функции между соседними эпохами.

4. Итерационное улучшение точности корреляционной обработки сигналов НКА ГЛОНАСС и математической интерпретации РСДБ-задержки, включающей параметры тропосферной и ионосферной рефракции, релятивистских эффектов и эффекта поляризации фазы навигационного сигнала ГЛОНАСС. Третий эксперимент, проведенный по шести НКА ГЛОНАСС, включал сеансы измерений, в которых оценивалась только фазовая задержка, получаемая программным коррелятором. Для интерпретации ионосферной погрешности РСДБ-задержки при работе по НКА ГЛОНАСС были использованы апостериорные ионосферные карты Системы высокоточного определения эфемерид и временных поправок (СВОЭВП) [7, 8].

Полученные результаты показали наличие линейного тренда, вызванного неучтенной разностью хода часов станций РСДБ. Компенсация этой систематической ошибки позволила получить зависимость невязок измерений, генерируемых соответственно техниками РСДБ и ГНСС, описываемую квадратичным полиномом с амплитудой до 80 см (рис. 2).

Остаточную величину невязок в виде квадратичной функции было решено устранить путем уточнения рефракции сигнала в атмосфере и модели РСДБ-задержки.

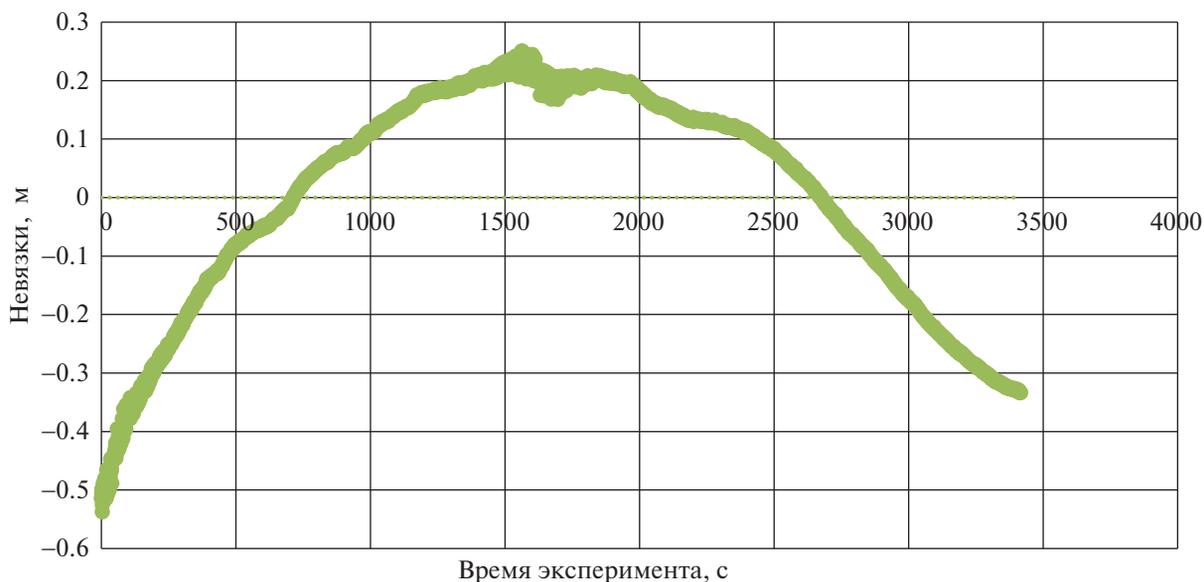


Рис. 2. Невязки РСДБ-измерений по сигналам НКА после вычета линейного тренда



Рис. 3. Первые разности ГНСС-измерений после вычета линейного тренда

В интересах организации итеративного процесса уточнения математической интерпретации РСДБ-задержки были получены оценки так называемых первых разностей ГНСС-измерений (SD, Single difference) (рис. 3).

Анализ результатов обработки показал, что в данном случае упомянутого выше квадратично-го тренда, полученного в условиях работы с РСДБ-задержками, не наблюдается.

Следующий этап обработки состоял в формировании разностей между РСДБ-задержкой (рис. 4) и SD-измерениями ГНСС-приемников, что отражено на рис. 5.

Как следует из зависимостей, приведенных на рис. 5, в разностных измерениях присутствует ярко выраженный линейный тренд, обусловленный существенным различием между шкалами времени ГНСС и РСДБ. В результате исключения линейного тренда в разностных измерениях выявляется квадратичная составляющая (рис. 6), что свидетельствует либо о неадекватности модели РСДБ-задержки, либо об ошибках, возникающих при корреляционной обработке, либо о некорректном учете ионосферы при интерпретации фазовой задержки.

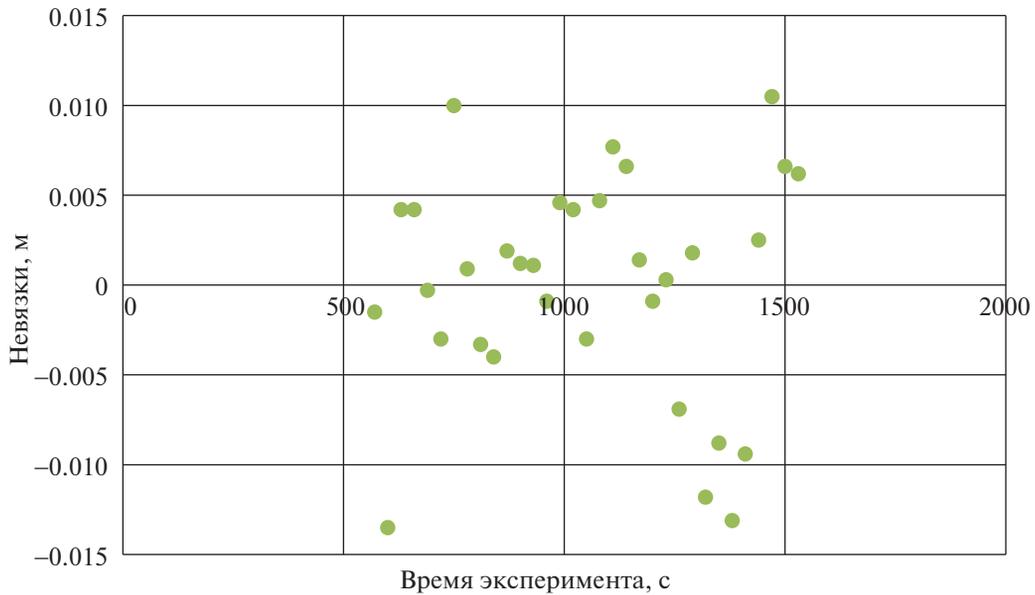


Рис. 4. Первые разности РСДБ-измерений после вычета линейного тренда

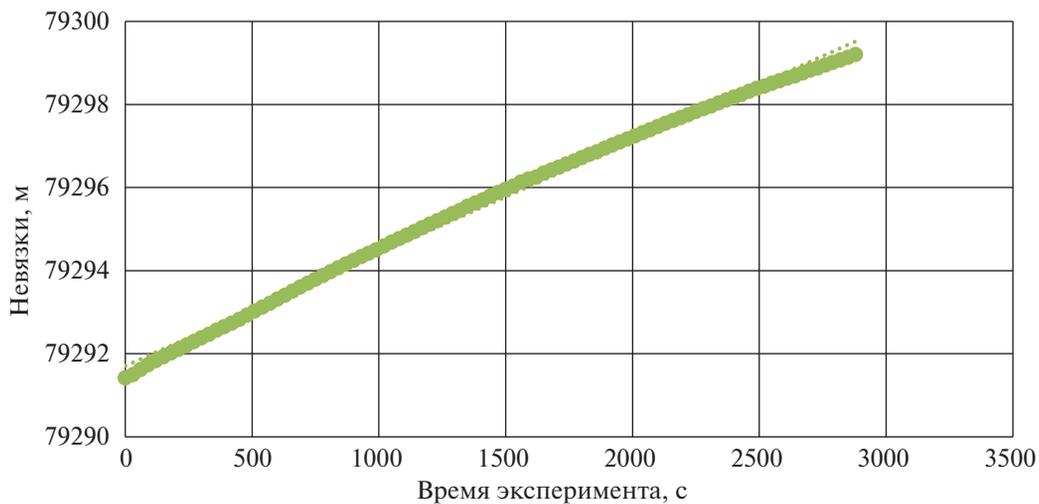


Рис. 5. Разность РСДБ-задержки и первых разностей ГНСС-измерений при работе станций по шести НКА

Дальнейший анализ оценок групповой и фазовой задержки не принес положительных результатов с точки зрения интерпретации фазовой задержки в ионосфере, в связи с чем был сделан вывод о необходимости использования РСДБ-сигналов на двух частотах, что потенциально может позволить получать ионосферную задержку непосредственно из РСДБ-измерений.

Таким образом, вследствие недостаточной точности интерпретации РСДБ-задержки получить оценки параметров трансформации Гельмерта применительно к системам координат, используемыми техниками ГНСС и РСДБ соответственно, пока не удастся. Тем не менее, проведение описанных выше дополнительных экспериментов, в том числе по шести НКА ГЛОНАСС, позволило улучшить точность получаемых оценок невязок РСДБ-задержки в 2 раза. Таким образом, можно ожидать, что в результате проведения измерений по всем 24 НКА ГЛОНАСС точность оценки невязок РСДБ-задержки повысится до миллиметрового уровня, что позволит использовать РСДБ-измерения по сигналам НКА ГЛОНАСС, т.е. совместить СК ГНСС и РСДБ.

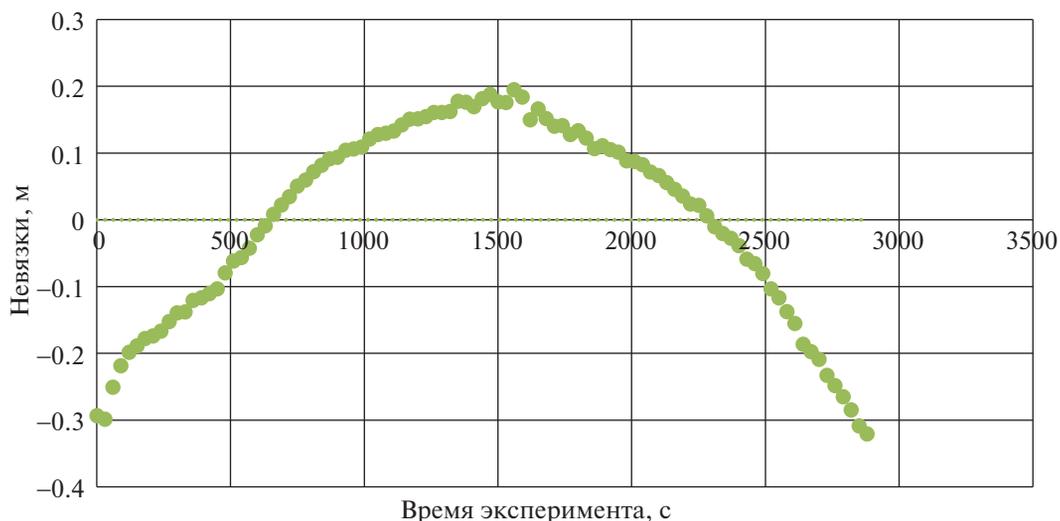


Рис. 6. Разность РСДБ-задержки и первых разностей ГНСС-измерений при работе станций по шести НКА после вычета линейного тренда

Заключение. Продолжены эксперименты в интересах реализации подхода к решению проблемы повышения точности эфемерид ГЛОНАСС до уровня, обеспечивающего конкурентоспособность этой системы на мировом рынке соответствующих услуг. Как и прежде, в основе подхода – совместное использование техник ГНСС, КОС и РСДБ с целью дальнейшей обработки измерений, генерируемых перечисленными техниками.

В процессе отработки методики получения и обработки измерений НКА ГЛОНАСС с привлечением сети наземных станций РСДБ были решены следующие частные задачи:

произведено уточнение методики проведения ГНСС-измерений с помощью станций РСДБ;

повышена точность математической интерпретации ошибок РСДБ-измерений по сигналам ГНСС до 5–8 см;

улучшена точность интерпретации РСДБ-задержки по НКА в части учета параметров тропосферной и ионосферной рефракции;

улучшена точность интерпретации задержек сигнала в части учета релятивистских эффектов и эффекта поляризации фазы навигационного сигнала ГЛОНАСС;

итерационно доработано ПМО интерпретации измерений с учетом приведенных выше параметров различных задержек сигналов;

получен размер невязок РСДБ- и ГНСС-измерений на уровне 20 см (СКО).

Полученные результаты обработки измерений, позволившие итерационно уточнить ряд параметров моделей ошибок измерений, потенциально обеспечивают возможность интеграции данных ГНСС- и РСДБ-измерений для колокации техник ГНСС, КОС и РСДБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красильщиков М.Н., Кружков Д.М., Пасынков В.В. Современные задачи совершенствования координатно-временного обеспечения ГЛОНАСС и перспективные методы их решения. I. Совмещение систем координат, используемых различными информационными технологиями в интересах уточнения положения геоцентра // Изв. РАН. ТиСУ. 2019. № 4.
2. Пасынков В.В., Брагинец 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 // Тез. докл. VII 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 радио-астрометрическая 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. Глобальная спутниковая навигационная система ГЛОНАСС. Система высокоточного определения эфемеридно-временных поправок // Интерфейсно-контрольный документ (редакция 3.0). М., 2010. 94 с.
 8. [Электронный ресурс], http://www.glonass-svoevp.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=55&Itemid=259&lang=ru, дата доступа: 27.03.2019.