

Перспективы применения радиоинтерферометрических средств для высокоточных траекторных измерений в области геодезических и навигационных систем

© Д. А. Гаврилов¹, И. В. Сахно¹, И. Ф. Суркис²

¹Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия

²ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Abstract

Одним из возможных путей повышения точности определения орбит космических аппаратов является использование технологии, основанной на РСДБ, которая позволяет ввести в систему уравнений по определению начальных условий вектора состояния космического аппарата высокоточные угломерные (или разностно-дальномерные) измерения и, в конечном итоге, повысить точность навигационно-баллистического обеспечения.

Для оценки точности измерений проведены эксперименты по наблюдению КА ГЛОНАСС радиотелескопами РСДБ-комплекса «Квазар-КВО». Обработка наблюдений выполнена двумя методами: кодовые и фазовые задержки получены средствами Matlab в режиме одиночной антенны и разностных сигналов; групповые и фазовые задержки получены штатным Программным коррелятором РСДБ-комплекса «Квазар-КВО». Приведено сравнение результатов.

При обработке средствами Matlab короткого (секундного) интервала наблюдений в режиме одиночной антенны получены точности кодовых задержек 400–500 мм и фазовых 0.2–0.3 мм. Следующий эксперимент был более длительным, на 300-секундном скане и секундном периоде накопления средствами Matlab получены точности разностных сигналов 75.1 мм кодовой и 0.5 мм фазовой задержки. Этот же эксперимент обработан Программным коррелятором РСДБ-комплекса, получены групповые задержки с точностью 23.8 мм и фазовые задержки с точностью 0.5 мм. Наблюдается хорошая сходимости между задержками, полученными средствами Matlab и Программным коррелятором.

Достигнута высокая инструментальная точность задержек, что позволяет сделать вывод о перспективности и целесообразности дальнейших исследований в области РСДБ-технологий в приложении к траекторным измерениям космического аппарата.

Ключевые слова: навигационная задача, радиоинтерферометр со сверхдлинной базой, РСДБ, космический аппарат, коррелятор.

Контакты для связи: Суркис Игорь Феликсович (surkis@iaaras.ru).

Для цитирования: Гаврилов Д. А., Сахно И. В., Суркис И. Ф. Перспективы применения радиоинтерферометрических средств для высокоточных траекторных измерений в области геодезических и навигационных систем // Труды ИПА РАН. 2024. Вып. 71. С. 26–33.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.71.26-33>

Perspective of the Radio Interferometric Tools Using for High-Precision Trajectory Measurements of Geodetic and Navigation Field

D. A. Gavrilov¹, I. V. Sakhno¹, I. F. Surkis²

¹A. F. Mozhaysky Military-Space Academy Saint Petersburg, Russia

²Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

Abstract

One of the possible ways to spacecraft orbits determination precision improvement is the very long baseline interferometry (VLBI) method using. It allows to add high-precision angular (or difference-ranging) measurements into the system of equations for determining the initial conditions of the spacecraft state vector, and, in the long run, increase the accuracy of navigation support.

To estimate the accuracy of measurements the experiments, of GLONASS spacecraft observations by Quasar VLBI Network radio telescopes have been carried out. The observations were processed by two methods: using Matlab software in the mode of a single antenna and difference signals, codes were obtained in the single antenna and difference signals modes, while group and phase delays were obtained by the standard software correlator of Quasar VLBI Network "RASFX". A comparison of the results is given.

The code delays precision of 400–500 mm and phase delays precision of 0.2–0.3 mm were obtained when processing a short (second) observation interval using Matlab in the single antenna mode. In the next 300-second experiment, using a one second accumulation period, Matlab obtained the precision of difference signals of 75.1 mm code and 0.5 mm phase delay. The same experiment was processed by the RASFX correlator, group delays with a precision of 23.8 mm and phase

delays with a precision of 0.5 mm were obtained. There is a good agreement between the delays obtained by Matlab and those by the RASFX correlator.

High instrumental precision of delays has been achieved, which allows us to conclude that further research in the field of VLBI technologies in application to spacecraft trajectory measurements is expedient.

Keywords: navigation task, very long baseline interferometer, VLBI, spacecraft, correlator.

Contacts: Igor F. Surkis (surkis@iaaras.ru).

For citation: Gavrilov D. A., Sakhno I. V., Surkis I. F. Perspective of the radio interferometric tools using for high-precision trajectory measurements of geodetic and navigation field // Transactions of IAA RAS. 2024. Vol. 71. P. 26–33.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.71.26-33>

Введение

В настоящее время навигационно-баллистическое обеспечение космических аппаратов (КА) различного назначения осуществляется при помощи широкой номенклатуры средств измерений текущих навигационных параметров как наземного базирования, так и размещенных непосредственно на борту КА, например навигационной аппаратуры потребителей ГНСС. Качество решения целевой задачи КА (при координатном способе управления) в конечном итоге зависит от точности определения его местоположения в заданные моменты времени, что, в свою очередь, определяется точностью траекторных измерений.

Одним из возможных путей повышения точности определения орбиты КА является использование технологии, основанной на РСДБ, которая позволяет ввести в систему уравнений по определению начальных условий вектора состояния КА высокоточные угломерные (или разностно-дальномерные) измерения.

В Российской Федерации существует постоянно действующая национальная РСДБ-сеть — комплекс Квазар-КВО ([Shuygina et al., 2019](#)), ([Радиоинтерферометрический комплекс, 2023](#)). В состав комплекса входят три радиоастрономические обсерватории: «Светлое» (Ленинградская область), «Зеленчукская» (Карачаево-Черкесия) и «Бадарь» (Республика Бурятия). Обсерватории объединены высокоскоростными волоконно-оптическими линиями связи с Центром управления, сбора и обработки данных (г. Санкт-Петербург) в глобальный

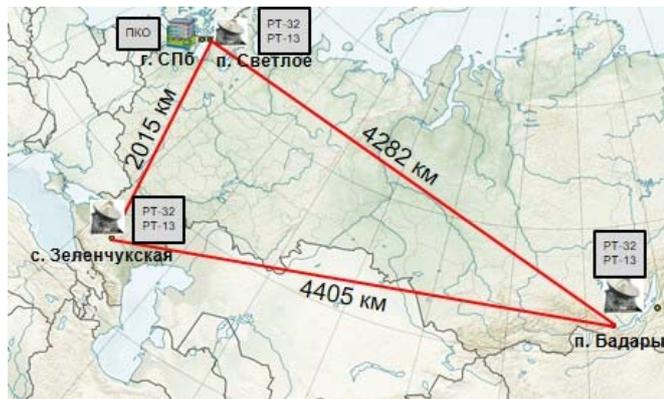


Рис. 1. Радиоинтерферометрический комплекс Квазар-КВО

радиотелескоп с эффективным диаметром «зеркала» более 4400 км (рис. 1). Разработчиком и организацией, осуществляющей эксплуатацию комплекса, является Институт прикладной астрономии РАН (г. Санкт-Петербург).

В перспективе в состав комплекса войдет пункт колокации в г. Уссурийске, создаваемый в рамках ОКР «Квazar-У», который будет включать два 13-метровых радиотелескопа.

Кроме того, подпрограммой «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС» Государственной программы Российской Федерации «Космическая деятельность России» предусмотрены опытно-конструкторские работы в интересах специальных потребителей (по линии Минобороны России), предполагающие в том числе развитие комплекса средств определения и прогнозирования ПВЗ, измерение текущих навигационных параметров ГНСС ГЛОНАСС и Космической геодезической системы.

В данной работе приведены результаты экспериментов по наблюдению КА ГЛОНАСС на РСДБ-комплексе «Квazar-КВО». Обработка наблюдений проведена средствами Matlab и штатным коррелятором РСДБ-комплекса «Квazar-КВО». Показана сходимость результатов двух средств обработки, подтверждающая достоверность получаемых задержек. Получены оценки точности фазовой задержки в доли миллиметров на интервале накопления 1 с.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности и целесообразности дальнейших исследований в области РСДБ-технологий в приложении к траекторным измерениям КА, в том числе КА ГЛОНАСС.

Теоретические основы применения РСДБ для траекторных измерений

Основным достоинством РСДБ-систем является высокая точность измерения направления на источник радиосигнала, которая определяется угловым разрешением радиоинтерферометра (шириной диаграммы направленности главного лепестка).

Так, например, при использовании «короткой» базы комплекса («Светлое — Зеленчукская») ширина диаграммы направленности для L1 диапазона (18 см) ГНСС ГЛОНАСС составляет 0.019 угл. с,

линейное разрешение (на дальности 20000 км) — 1.86 м. При использовании «длинной» базы комплекса («Зеленчукская — Бадарь») ширина диаграммы направленности составляет 0.0087 угл. с, линейное разрешение на дальности 20000 км — 0.85 м.

Следует отметить, что указанные значения разрешающей способности комплекса характеризуют инструментальную точность измерения, которая может быть улучшена (примерно на два порядка) в зависимости от характеристик используемых элементов схемы слежения за фазой сигналов.

Кроме того, в случае наличия передающей аппаратуры на борту КА появляется возможность дополнительно уточнять параметры опорного сигнала, используемого в алгоритмах обработки информации, с помощью наземной сети пассивных антенных систем.

Для оценки возможности использования метода РСДБ для реализации высокоточных траекторных измерений были проведены эксперименты по определению относительного времени запаздывания сигналов КА ГНСС ГЛОНАСС с помощью комплекса «Квазар-КВО».

Результаты обработки РСДБ-измерений

Для оценки возможности программной обработки измерительной информации были получены от ИПА РАН файлы в формате Mark5B. Записи были сделаны при наблюдении НКА ГЛОНАСС № 7 тремя радиотелескопами, расположенными в радиообсерваториях ИПА РАН («Светлое», «Зеленчукская», «Бадарь») 7 мая 2017 г. на тактовой частоте 32 МГц (полоса сигнала – 16 МГц) и разрядности АЦП – 2 бита. Схема проведения космического эксперимента представлена на рис. 2.

Обработка производилась средствами Matlab (Бахолдин и др., 2018) по двум схемам: при реализации «классической» схемы слежения за парамет-



Рис. 2. Схема проведения космического эксперимента по сопровождению НКА ГЛОНАСС

рами сигнала стандартной точности с использованием опорного псевдодальномерного кода (для навигационной аппаратуры потребителей ГНСС ГЛОНАСС) и модифицированной схемы — слежением за разностным сигналом.

Пример слежения за параметрами сигнала при реализации «классической» схемы слежения — с задержкой (delay-locked loop – DLL) и частотой (phase-locked loop – PLL) — представлен на рис. 3, 4 и в табл. 1.

На рис. 4 приведены измерения псевдодальности, полученные по фазовым измерениям на интервале 4 с (в метрах, убран полиномиальный 3-й степени тренд) для трех радиотелескопических станций. Причем для обсерватории «Зеленчукская» характерны скачки по фазе.

Таблица 1

Результаты оценки точностных характеристик, полученных в ходе космического эксперимента

| № п/п | Обсерватория | Отношение с/ш, дБ | СКО задержки, м | | СКО частоты Доплера, Гц |
|-------|----------------|-------------------|------------------|------------------------|-------------------------|
| | | | Кодовая задержка | Фазовая задержка | |
| 1. | «Светлое» | 64.4884 | 0.4303 | $2.1521 \cdot 10^{-4}$ | 0.1814 |
| 2. | «Зеленчукская» | 68.2289 | 0.4594 | $2.7400 \cdot 10^{-4}$ | 0.2023 |
| 3. | «Бадарь» | 70.2332 | 0.3918 | $1.4009 \cdot 10^{-4}$ | 0.1910 |

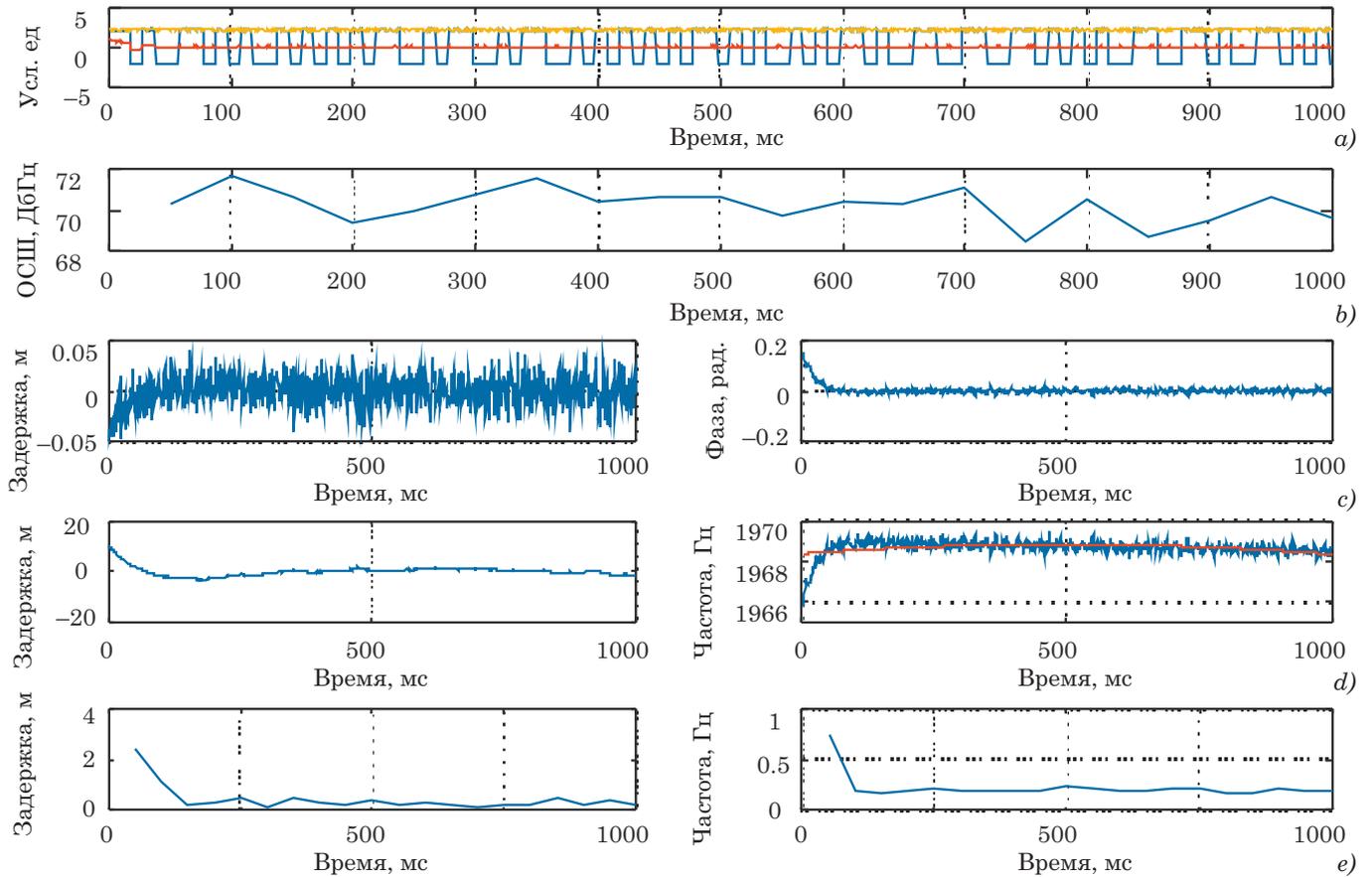


Рис. 3. Пример слежения за параметрами сигнала на интервале одна секунда: *a)* сигнал с выхода коррелятора (смена фазы соответствует информационным символам); *b)* отношение сигнал/шум (ОСШ); *c)* сигнал с выхода дискриминатора; *d)* результаты измерений задержки (слева, тренд убран полиномом для визуальной оценки погрешностей измерений); *e)* СКО задержки (слева) и частоты Доплера (справа)

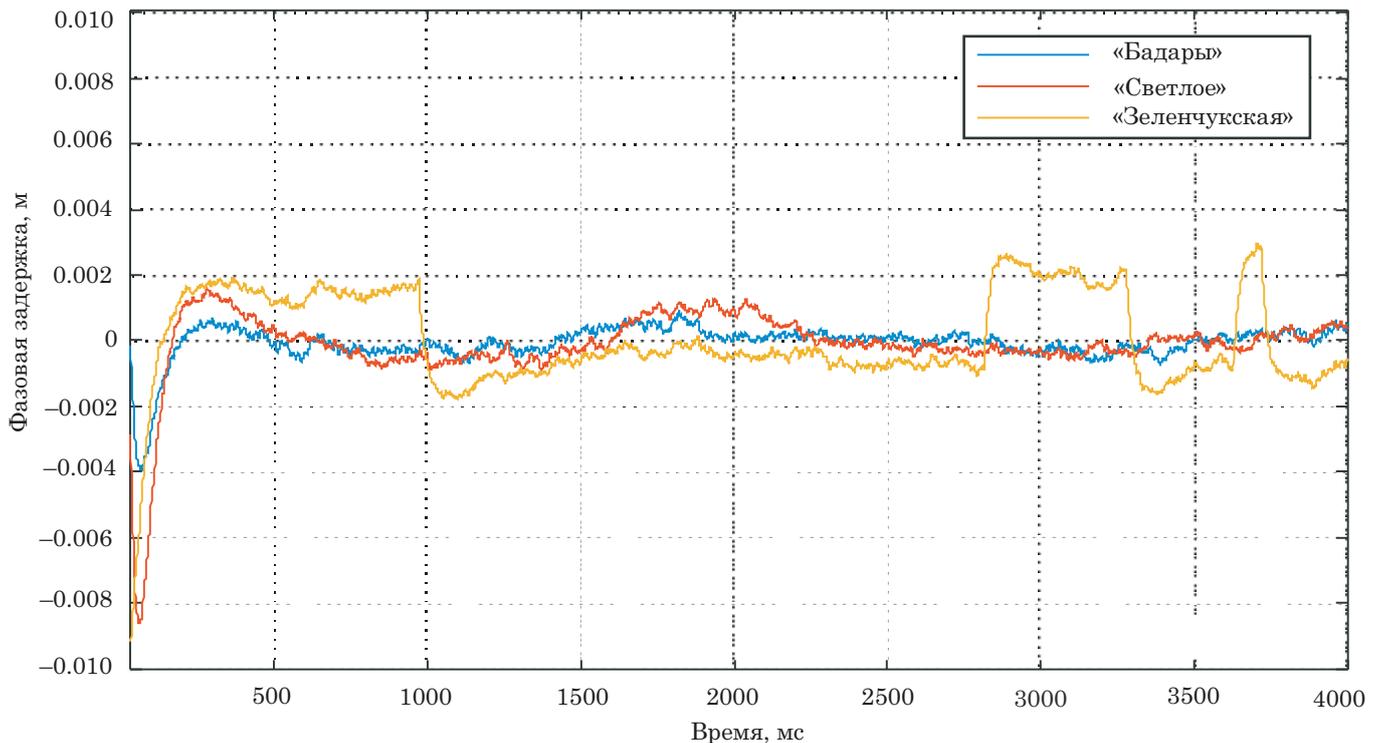


Рис. 4. Пример слежения за фазой сигнала на интервале 4 с

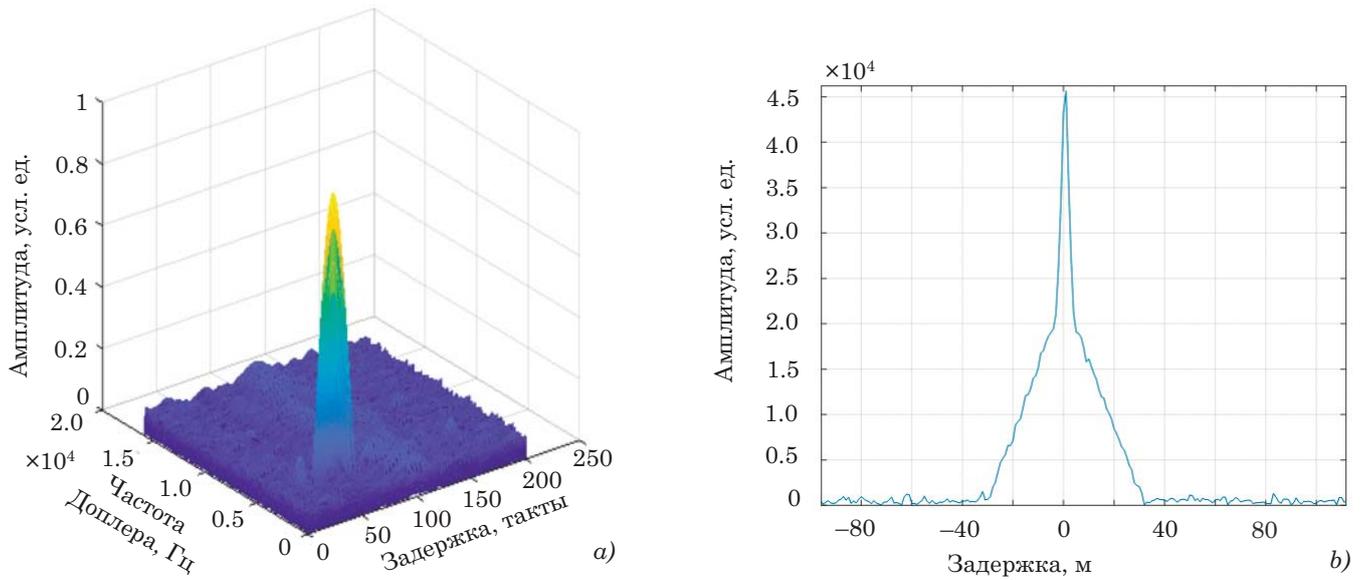


Рис. 5. Кросс-корреляционный отклик сигнала на интервале 1 мс: *a)* зависимость амплитуды отклика от задержки и частоты Доплера; *b)* зависимость амплитуды отклика от задержки

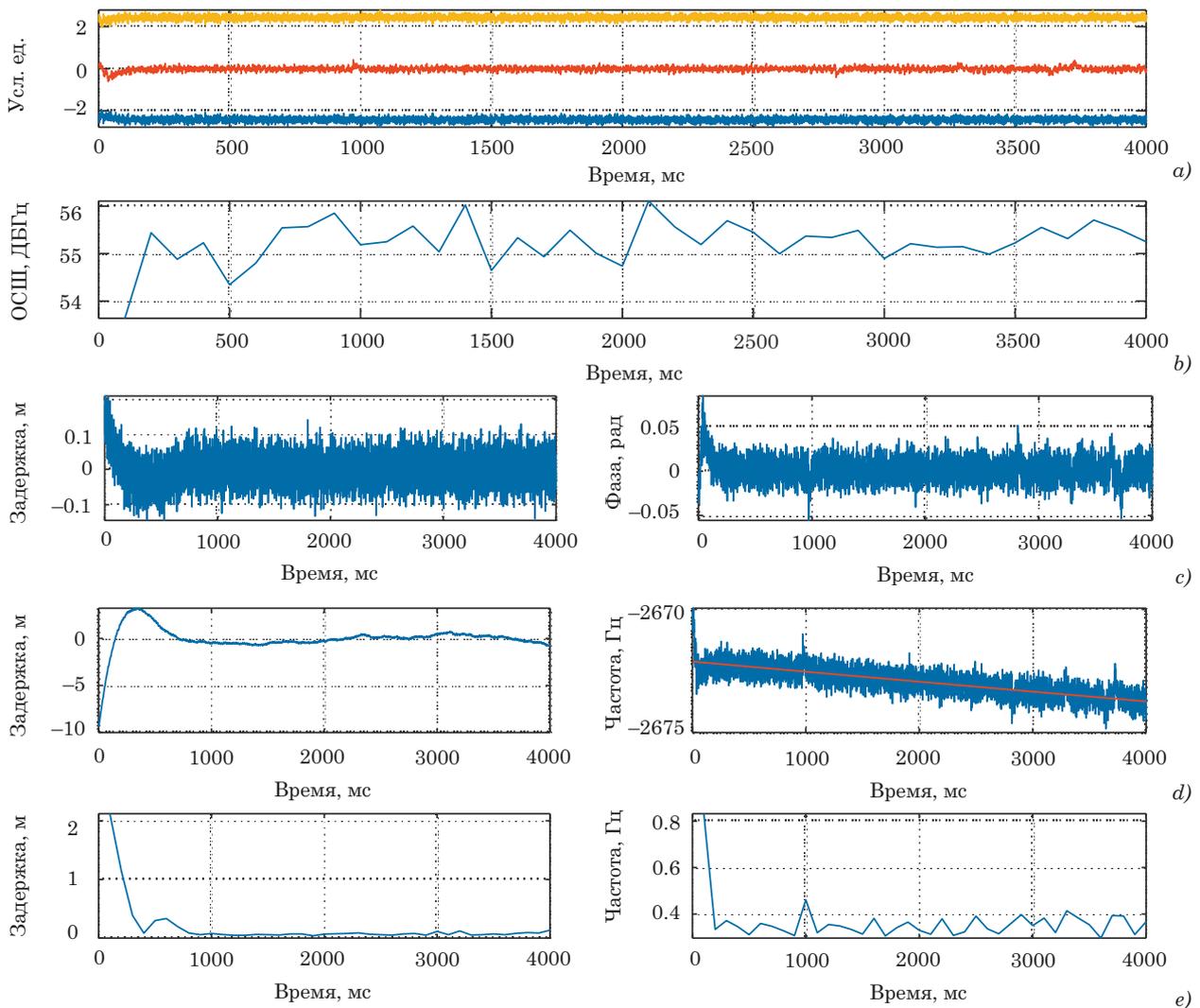


Рис. 6. Пример слежения за параметрами кросс сигнала на интервале 4 с: *a)* сигнал с выхода коррелятора (отсутствуют информационные символы); *b)* Отношение сигнал/шум; *c)* сигнал с выхода дискриминатора задержки (слева) / фазы (справа); *d)* результаты измерений задержки, тренд убран полиномом для визуальной оценки погрешностей измерений (слева), частоты Доплера (справа); *e)* СКУ задержки (слева) и частоты Доплера (справа)

Результаты слежения за разностным сигналом

| № п/п | База | Отношение с/ш | СКО задержки, м | | СКО частоты Доплера, Гц |
|-------|------------------------------|---------------|------------------|------------------------|-------------------------|
| | | | кодовая задержка | фазовая задержка | |
| 1 | «Бадарь» — «Зеленчукская» | 55.2816 | 0.0677 | $1.4916 \cdot 10^{-4}$ | 0.3499 |

Далее был реализован алгоритм поиска и обнаружения кросс-корреляционного (разностного) сигнала на интервале 1 мс, результаты которого представлены на рис. 5. На рис. 5а представлено двумерное изображение пика (зависимость от задержки и частоты Доплера); на рис. 5b увеличен центр пика (зависимость от задержки), в котором проявился эффект сложения сигналов стандартной и высокой точности ГНСС ГЛОНАСС; за счет сложения сигналов средней и высокой точности отношение сигнал/шум выросло на 1.8.

Далее реализовано слежение за разностным сигналом. Пример слежения представлен на рис. 6, результаты — в табл. 2.

СКО задержки разностных сигналов имеет меньшие значения, чем в случае работы с сигналами одиночных антенн, так как фактически реализовано слежение за суммой сигналов средней и высокой точности (полоса которого в 10 раз

больше, а следовательно, выше потенциальная точность измерений).

Обработка сигналов проведена также на созданном в ИПА РАН программном РСДБ-корреляторе (корреляторе RASFX), (Зимовский и др., 2018). Аналогичные эксперименты проводились и ранее (Пасынков и др., 2022). На рис. 7 представлены результаты обработки 500-секундного скана наблюдений — фазовые задержки на интервалах накопления одна секунда, после снятия полиномиального тренда.

Заметны биения задержки с размахом 1–2 мм и периодичностью около одной минуты, их природа пока непонятна. Возможно, они связаны с неоднородностью атмосферы.

СКО полученных коррелятором фазовых задержек на секундных интервалах составило около 0.3 мм, что хорошо совпадает с СКО задержек, полученных средствами Matlab.

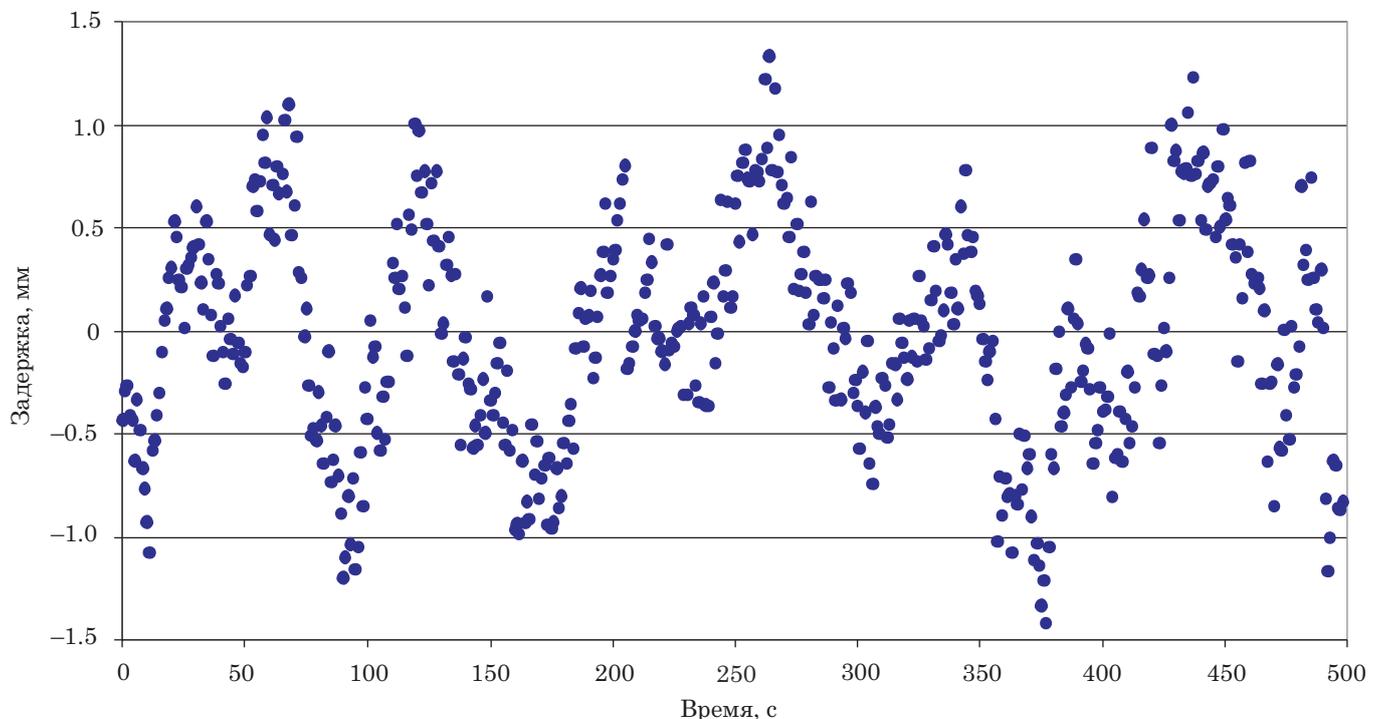


Рис. 7. Фазовая задержка, мм, после удаления тренда, полученная Программным коррелятором РАН (РСДБ-коррелятор RASFX) на 500-секундном скане наблюдений

Таблица 3

СКО задержек пакетом Matlab и коррелятором RASFX в эксперименте 1 октября 2022 г., база «Бадарь» — «Зеленчукская»

| Наименование | СКО задержки, мм |
|---|------------------|
| Кодовая задержка, полученная средствами Matlab | 75.1 |
| Фазовая задержка, полученная средствами Matlab | 0.5 |
| Групповая задержка, полученная коррелятором RASFX | 23.8 |
| Фазовая задержка, полученная коррелятором RASFX | 0.5 |

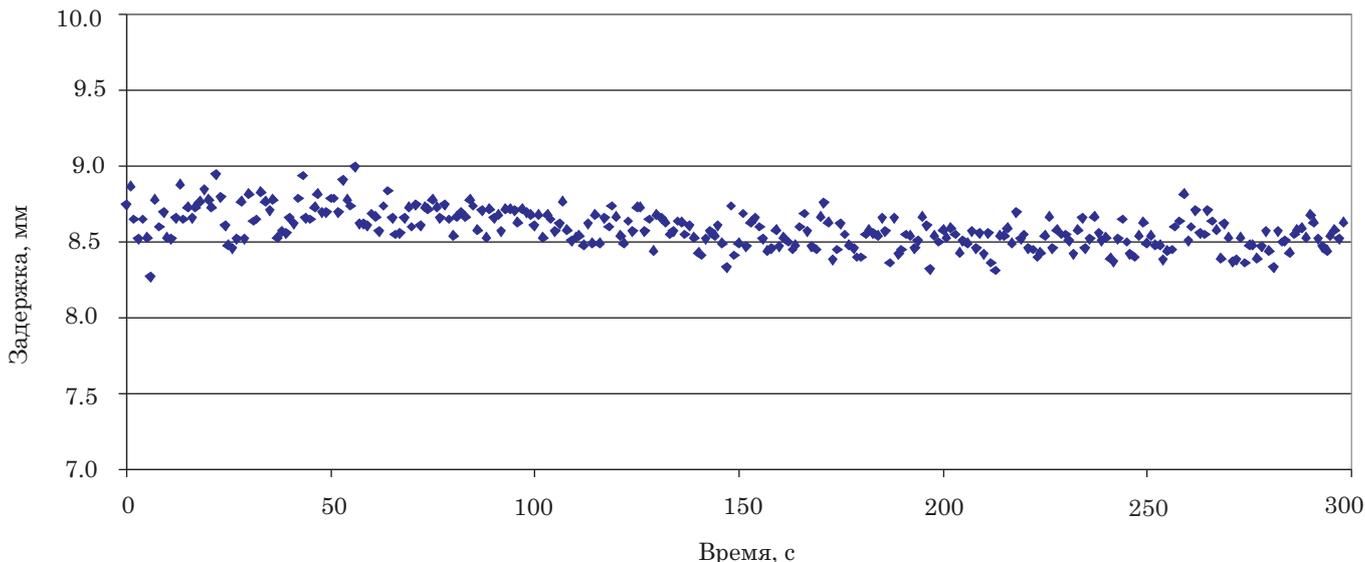


Рис. 8. Разность кодовой задержки, полученной средствами Matlab, и групповой задержки, полученной коррелятором RASFX. Эксперимент 1 октября 2022 г., база «Бадарь» — «Зеленчукская»

Дополнительное сравнение методов обработки проведено по данным эксперимента 1 октября 2022 г., в котором наблюдался космический аппарат ГЛОНАСС № 15 в режиме, аналогичном режиму эксперимента 7 мая 2017 г. Пятиминутный скан наблюдений был обработан средствами Matlab (слежением за разностными сигналами) и коррелятором RASFX. На секундных периодах накопления были получены кодовые (средствами Matlab), групповые (коррелятором RASFX) и фазовые задержки. Оценены точности (СКО) задержек, полученных средствами Matlab и коррелятором RASFX.

СКО фазовых задержек (табл. 3), полученных двумя средствами обработки, совпадают и составляют в данном эксперименте 0.5 мм на секундном периоде накопления. Точности групповой и кодовой задержек отличаются, что связано с методами обработки данных.

Достоверность определяемых задержек подтверждается почти постоянной разностью между кодовой задержкой, полученной средствами Matlab, и групповой задержкой, полученной коррелятором RASFX (рис. 8); сами задержки на данном интервале меняются на 126 км. Сдвиг между задержками (на 8.5 м) объясняется разностью по-

казаний водородных стандартов времени станций (при обработке РСДБ-наблюдений данный параметр определяется отдельно в ходе анализа данных).

Заключение

Привлечение комплекса «Квазар-КВО» позволит на постоянной основе обрабатывать алгоритмические и программные решения по совместной обработке высокоточных измерений, а также технологии взаимной калибровки измерительных средств. Возможности уникального комплекса средств целесообразно ориентировать на более тесное взаимодействие с наземным комплексом управления (НКУ) ГЛОНАСС.

Вторым направлением интеграции с НКУ является реализация РСДБ-технологий с использованием крупноапертурных антенн Минобороны России и разветвленной сети пунктов системы единого времени с целью обеспечения повышения точностных характеристик эфемеридно-временной информации.

Предлагается продолжить исследования по формированию и обработке расширенного состава измерений. Наиболее перспективным является вектор измерений в составе: дальность, радиаль-

ная скорость, разность дальностей, направляющий косинус базы, угловая скорость базы.

На следующих этапах исследований планируется повысить точность калибровки измерительных трактов, обеспечено исключение расхождения часов на привлекаемых к измерениям радиообсерваториях. В частности, должна быть доработана методика измерений и по возможности осуществлен переход к двухчастотным измерениям (в частотных диапазонах $L1$, $L2$ и $L3$) для парирования влияния ионосферы, должны быть дополнительно откалиброваны приемные тракты радиообсерваторий и дополнительно учтены систематические аппаратурные задержки на этапе обработки измерений.

Полученные результаты, несмотря на ряд ограничений, позволяют сделать вывод о перспективности и целесообразности дальнейших исследований в области РСДБ-технологий применительно к траекторным измерениям. Поэтому направлением дальнейших исследований станет комплексный поиск и реализация путей повышения точности и уточнение тактико-технических требований к РСДБ-измерителям текущих навигационных параметров.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП/УНУ «Радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО» и ЦКП «Суперкомпьютерный центр «Высокопроизводительные вычисления в радиоастрометрии и космической геодезии».

Литература

Бахолдин В. С., Гаврилов Д. А., Герасименко И. С. и др. Мультисистемный программный приемник глобальных и региональных навигационных спутниковых систем // Труды ИПА РАН. 2018. Вып. 44. С. 11–17.

Зимовский В. Ф., Кен В. О., Курдубова Я. Л. и др. Радиоинтерферометрический коррелятор на графических процессорах // Приборы и техника эксперимента. 2018. №6. С. 8–16.

Пасынков В. В., Титов Е. В., Гулидов Д. А. и др. Обработка и анализ РСДБ-наблюдений космических аппаратов системы ГЛОНАСС комплексом «Квазар-КВО» // Труды ИПА РАН. 2022. Вып. 61. С. 3–27.

Радиоинтерферометрический комплекс Квазар-КВО [Электронный ресурс] URL: <http://iaaras.ru/quasar> (дата обращения 11.11.2024)

Shuygina N., Ivanov D., Ipatov A., Gayazov I., et al. Russian VLBI network “Quasar”: current status and outlook // Geodesy and Geodynamics. 2019. Vol. 10, Is. 2. P. 150–156. Doi: 10. 1016/j.geog.2018.09.008.