

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.5.1>

УДК: 629.783

СПОСОБ УТОЧНЕНИЯ КООРДИНАТ ФАЗОВОГО ЦЕНТРА АНТЕННЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА СИСТЕМЫ ГЛОНАСС НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ПЕРЕБАЗИРУЕМЫХ МАЛОГАБАРИТНЫХ ТЕЛЕСКОПОВ

А.П. Алёшкин, К.Д. Махаев, В.И. Мельничук

**Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д.13.**

Статья поступила в редакцию 4 февраля 2025 г.

Аннотация. Предложен способ уточнения координат фазового центра излучающей антенны КА системы ГЛОНАСС на основе использования радиоинтерферометрических измерений с длинной базой, сформированной перебазируемыми малогабаритными телескопами. Предлагается подход, ориентированный на применение передвижных средств радиоинтерферометрии в целях достижения прецизионного позиционирования фазового центра излучающей эфемериды антенны навигационного КА на орбите. Выполнено компьютерное моделирование, подтверждающее факт повышения точности расчета координат фазового центра антенны навигационного КА на основе обработки навигационных измерений в радиоинтерферометре с малогабаритными телескопами. Предложение может быть полезным для улучшения качественных показателей решения навигационной задачи потребителем за счет более высокоточного и оперативного определения положения навигационного КА на орбите при использовании данной информации функциональными дополнениями системы ГЛОНАСС.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, навигационный КА, радиоинтерферометрия с длинной базой, эфемеридно-временное обеспечение, фазовый центр антенны, передвижные малогабаритные радиотелескопы.

Автор для переписки: Алёшкин Андрей Петрович, a_aleshkin@mail.ru

Введение

В настоящее время эфемеридно-временное обеспечение навигационных космических аппаратов системы ГЛОНАСС осуществляется при помощи широкой номенклатуры наземных средств измерений текущих навигационных параметров (ТНП). Качество решения целевой задачи потребителем навигационной информации в конечном итоге определяется точностью определения его местоположения на заданные моменты времени, что, в свою очередь, зависит от погрешности навигационных измерений с использованием навигационно-временного поля ГНСС и эквивалентных пространственных условий проведения эксперимента (геометрический фактор).

При этом погрешность траекторных измерений зависит от ряда факторов (бюджет погрешностей), одним из важнейших среди которых является знание фактического положения фазового центра передающей антенны. Возможным путем повышения точности определения координат фазового центра антенны источника излучаемого сигнала является использование технологии, основанной на радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) [6,10], которая позволяет ввести в систему уравнений по определению начальных условий вектора состояния КА высокоточные разностно-дальномерные измерения, выполняемые без декодирования навигационного сигнала.

Основная часть

В Российской Федерации существует радиоинтерферометрический комплекс Квазар-КВО, в состав которого входят три радиоастрономические обсерватории: «Светлое» (Ленинградская область), «Зеленчукская» (Карачаево-Черкесская республика) и «Бадары» (республика Бурятия), соединенные высокоскоростными

волоконно-оптическими линиями связи с Центром управления, сбора и обработки данных (Санкт-Петербург) (Рис. 1).

Разработчиком и организацией, осуществляющей эксплуатацию комплекса и его применение по целевому назначению, является Институт прикладной астрономии РАН (г. Санкт-Петербург).

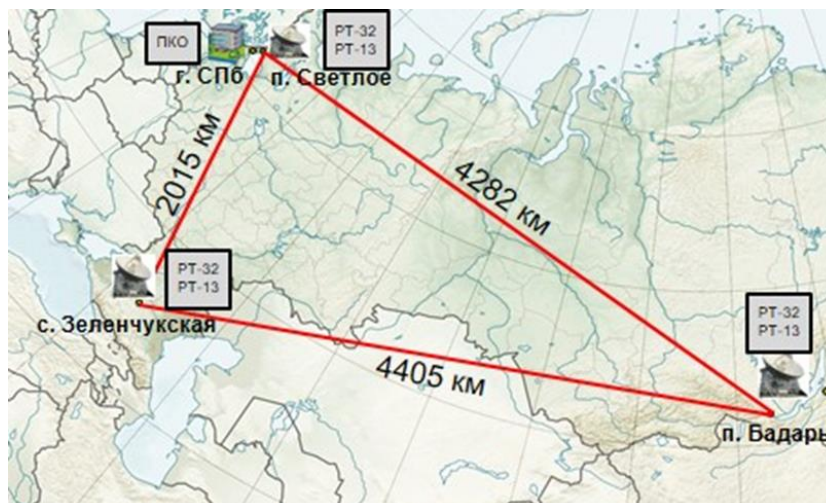


Рис. 1. Радиоинтерферометрический комплекс Квазар-КВО.

Каждая радиоастрономическая обсерватория имеет в своем составе следующее оборудование [3,4,5]:

- радиотелескоп (зеркальные антенные системы с диаметром 32 м и 13 м и приемный комплекс);
- трехсистемный приемник GPS/ГЛОНАСС/Galileo;
- квантово-оптическую систему «Сажень-ТМ-БИС»;
- радиометр водяного пара (РВП);
- водородный стандарт частоты Ч7-37;
- метеостанцию;
- локальную вычислительную сеть (Fast Ethernet и Gigabit Ethernet);
- систему жизнеобеспечения.

В перспективе комплекс Квазар-КВО должен пополниться пунктом ко-локации (г. Уссурийск), который будет включать сдвоенный тринадцатиметровый радиотелескоп. Основным достоинством РСДБ систем является прецизионная точность измерения направления на источник

радиосигнала, которая определяется высоким угловым разрешением радиоинтерферометра.

Так, например, при использовании «короткой» базы комплекса Квazar-КВО ширина диаграммы направленности для L1 диапазона ГНСС ГЛОНАСС составляет 0,019 угловых секунд. При этом линейное разрешение на дальности 20000 км составляет 1,86 м (на дальности 1000 км – 9,3 см). А при использовании «длинной» базы комплекса, ширина диаграммы направленности составляет 0,0087 угловых секунд, при этом линейное разрешение на дальности 20000 км составляет 0,85 м (на дальности 1000 км – 4,25 см) [8].

Следует отметить, что использование крупногабаритных неподвижных зеркальных антенн делает технологию радиоинтерферометрических измерений уязвимой к воздействию внешних возмущающих факторов. Кроме того, использование существующих антенн сопряжено только со стационарным вариантом радиоинтерферометрических измерений, а, следовательно, теряется возможность управления геометрическим фактором при решении навигационной задачи.

Как показали исследования, для решения задач координатно-временного обеспечения потребителей по радиоинтерферометрическим измерениям могут быть использованы антенные системы, диаметр зеркал в которых составляет менее 5 метров. Применение таких антенн делает возможным разработку перебазированного варианта радиотелескопа, что существенно повышает практическую значимость технологии радиоинтерферометрии применительно к решению задач позиционирования космических объектов.

Для оценки возможности использования РСДБ технологии было выполнено имитационное моделирование по измерению времени относительного запаздывания сигналов на перебазированных телескопах радиоинтерферометра, что позволило решить задачу уточнения координат фазового центра передающих целевую информацию антенн космических аппаратов системы ГЛОНАСС.

Схема проведения измерений при проведении моделирования может быть проиллюстрирована рис. 2. [9].



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

Моделирование и обработка измерений производились средствами программного пакета Matlab.

Пример спектра сигнала при его когерентном (10 мс) и некогерентном (1 с) накоплении после гетеродинирования представлен на рис. 3

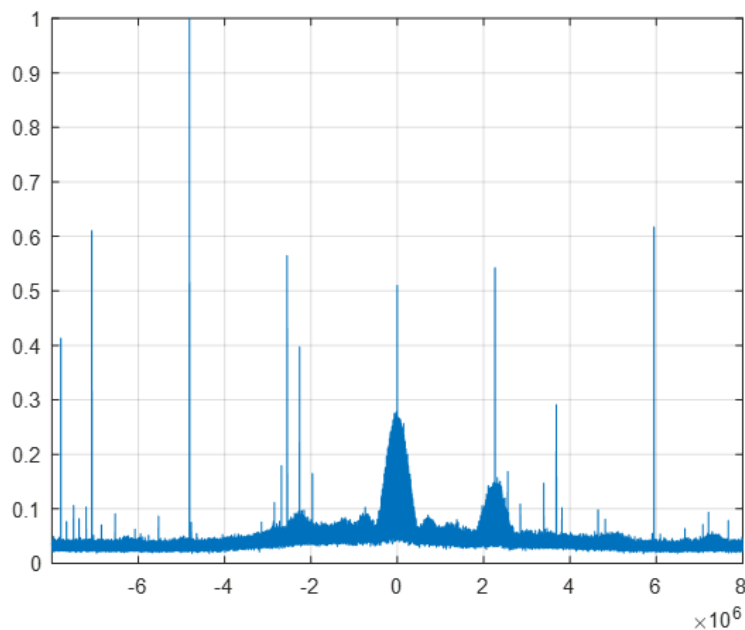


Рис. 3. Пример спектра сигнала в полосе 16 МГц.

В качестве источника радиосигнала в процессе моделирования использовался НКА ГНСС ГЛОНАСС №745.

Моделировалось использование антенных систем, расположенных в радиоастрономических обсерваториях «Светлое» и «Зеленчукская» – измерительная база 2015 км, также рассматривался вариант произвольного формирования радиоинтерферометрической базы с помощью перебазированных радиотелескопов.

Один из вариантов трассы НКА во время его сопровождения комплексом «Квазар-КВО», функций изменения его угловых координат: азимута и угла места представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

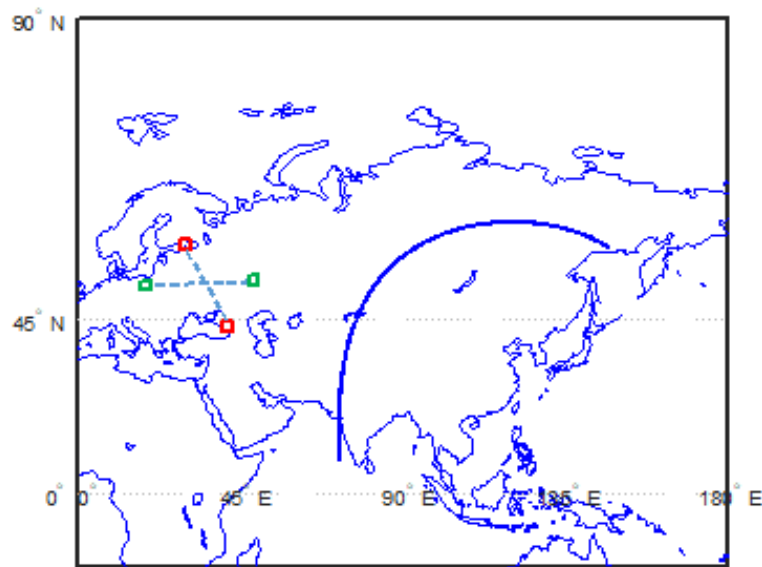


Рис. 4. Координаты приемных пунктов и трасса НКА.

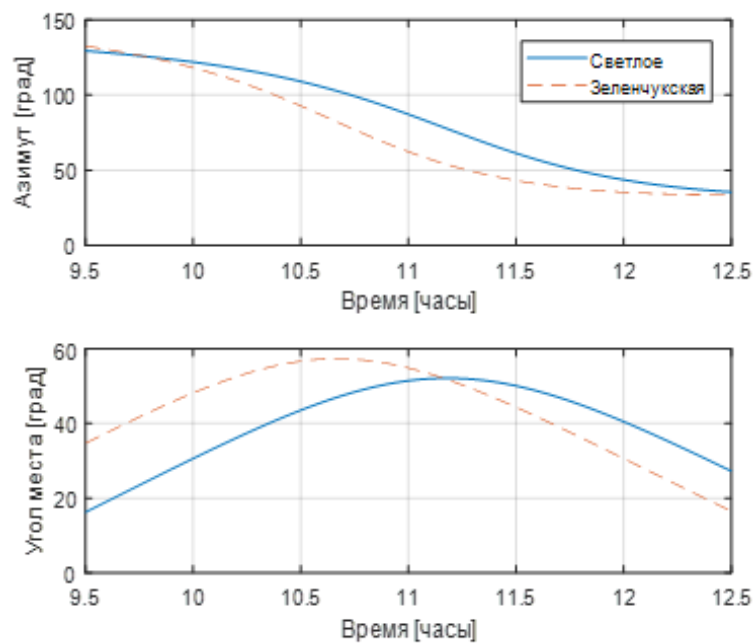


Рис. 5. Функции изменения азимута и угла места НКА.

В ходе проведения моделирования формировались задержки навигационного сигнала для базы «Зеленчукская-Светлое» и для произвольной радиоинтерферометрической базы с координатами 55.345117 с.ш., 46.706643 в.д (пункт 1) и 47.509716 с.ш., 20.596137 в.д. (пункт 2).

При решении навигационной задачи в качестве функции измерений использована временная зависимость разности моментов прихода радиосигнала на один пункт относительно другого $\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2$ [7].

Математически выбранный навигационный параметр можно выразить через формулы, определяющие евклидово расстояние и время задержки:

$$\Delta\tau = \left(\sqrt{(x_{нка} - x_1)^2 + (y_{нка} - y_1)^2 + (z_{нка} - z_1)^2} - \sqrt{(x_{нка} - x_2)^2 + (y_{нка} - y_2)^2 + (z_{нка} - z_2)^2} \right) / c, \quad (1)$$

где $x_{нка}, y_{нка}, z_{нка}$ – координаты фазового центра антенны навигационного КА;

$x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2$ – координаты радиотелескопов;

c – скорость света в вакууме.

В процессе моделирования рассмотрены варианты построения базы для радиоинтерферометрических измерений, ориентированной вдоль земной проекции трассы полета НКА и перпендикулярно ей.

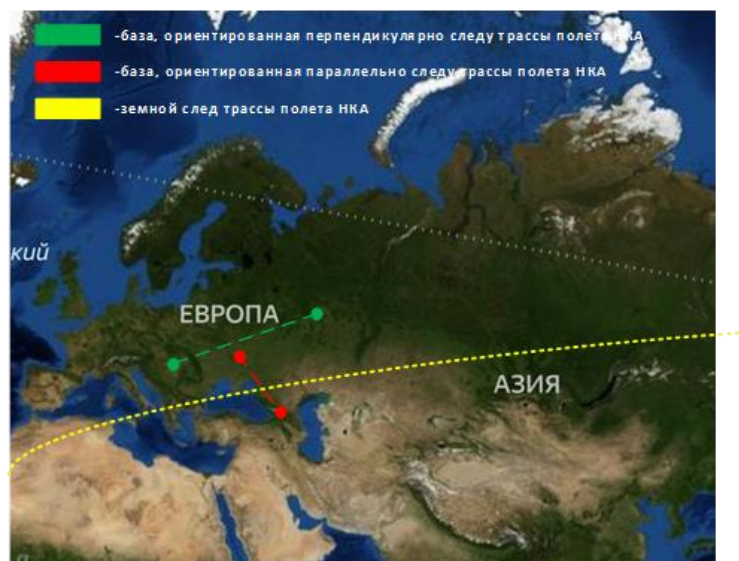


Рис. 6. Варианты произвольно выбранных радиоинтерферометрических баз и земной след трассы полета НКА.

Таким образом, исследовалось влияние геометрического фактора на показатели качества решения задачи уточнения координат фазового центра. Второй фактор – среднеквадратичная погрешность измерений разности времен прихода сигнала от НКА на радиотелескопы – моделировался с использованием характеристик, приведенных в рамках описания условий экспериментальных исследований [9].

Анализ статистических характеристик результатов решения навигационной задачи по уточнению координат фазового центра передающей антенны НКА проводился по итогам измерений на интервалах длительностью 20-60 минут. Для решения навигационной задачи использовался обобщенный метод наименьших квадратов (МНК).

Результаты моделирования процесса уточнения координат фазового центра передающей антенны НКА ГНСС по измерениям разности времен прихода сигнала на разнесенные радиотелескопы в виде среднеквадратичной погрешности оценки местоположения, полученные с помощью разработанного программного комплекса, представлены на рисунках 6-14.

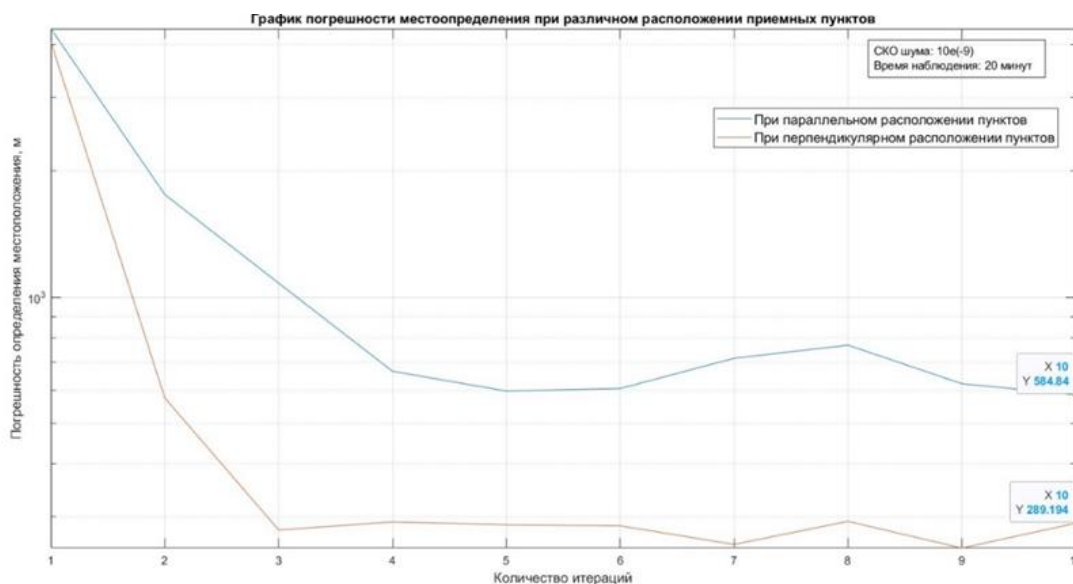


Рис. 6. Погрешность определения фазового центра антенны НКА.

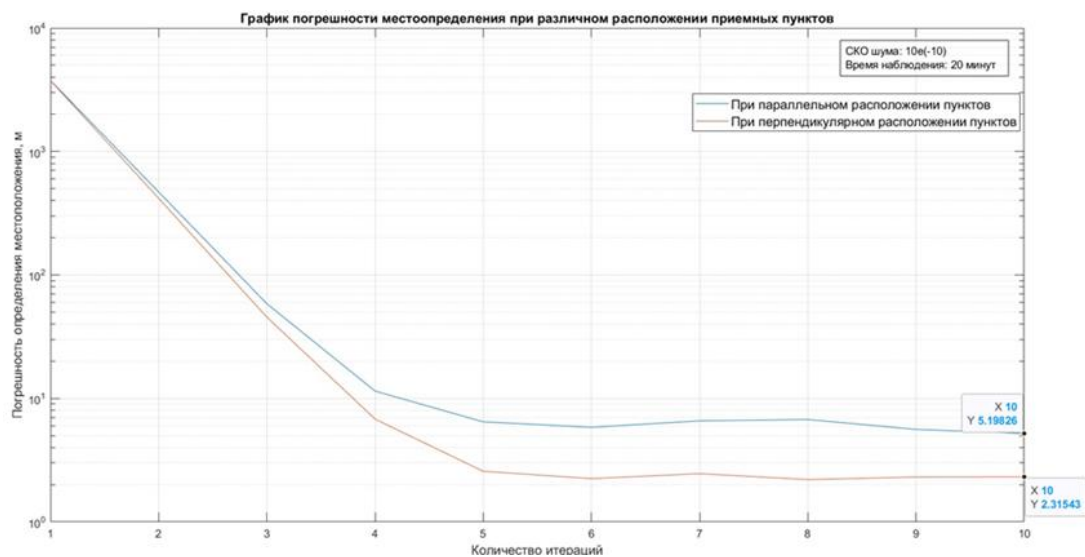


Рис. 7. Погрешность определения фазового центра антенны НКА.

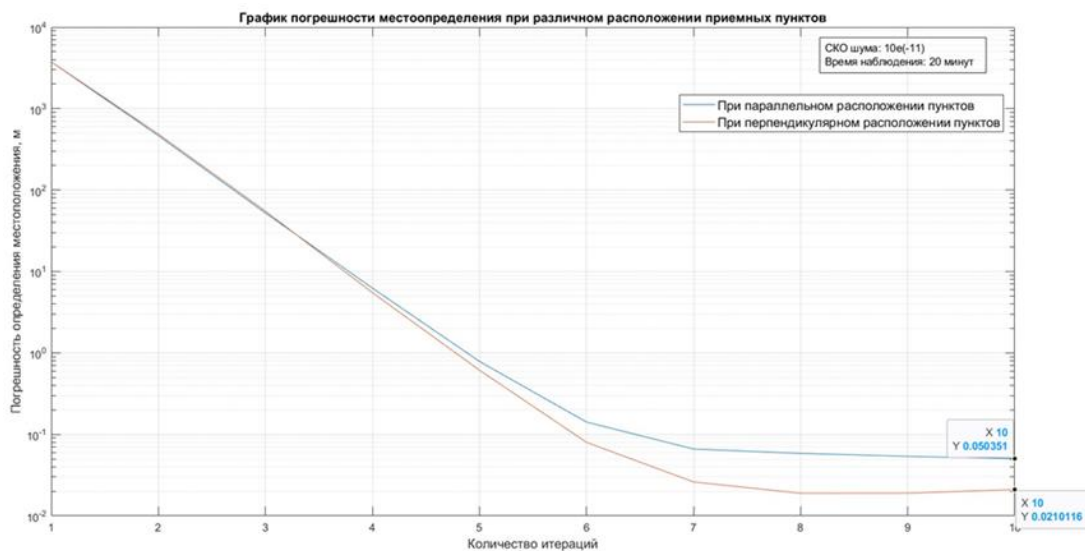


Рис. 8. Погрешность определения фазового центра антенны НКА.

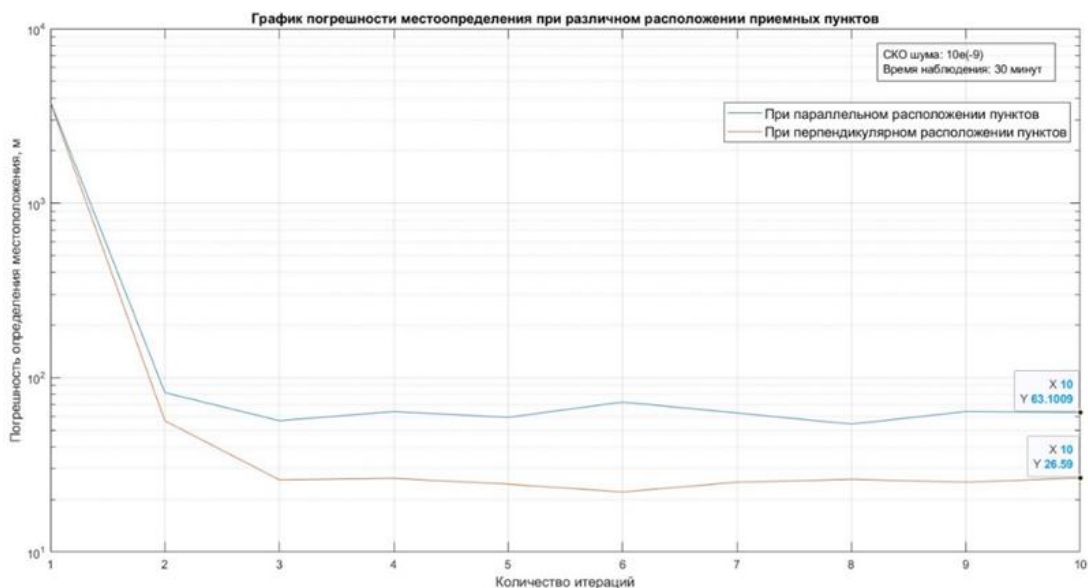


Рис. 9. Погрешность определения фазового центра антенны НКА.

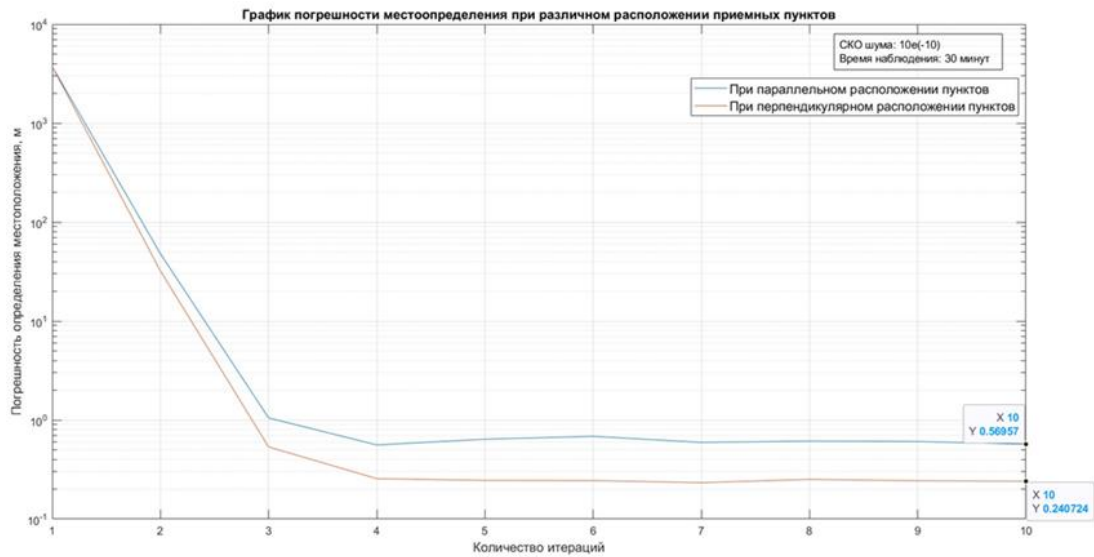


Рис. 11. Погрешность определения фазового центра антенны НКА.

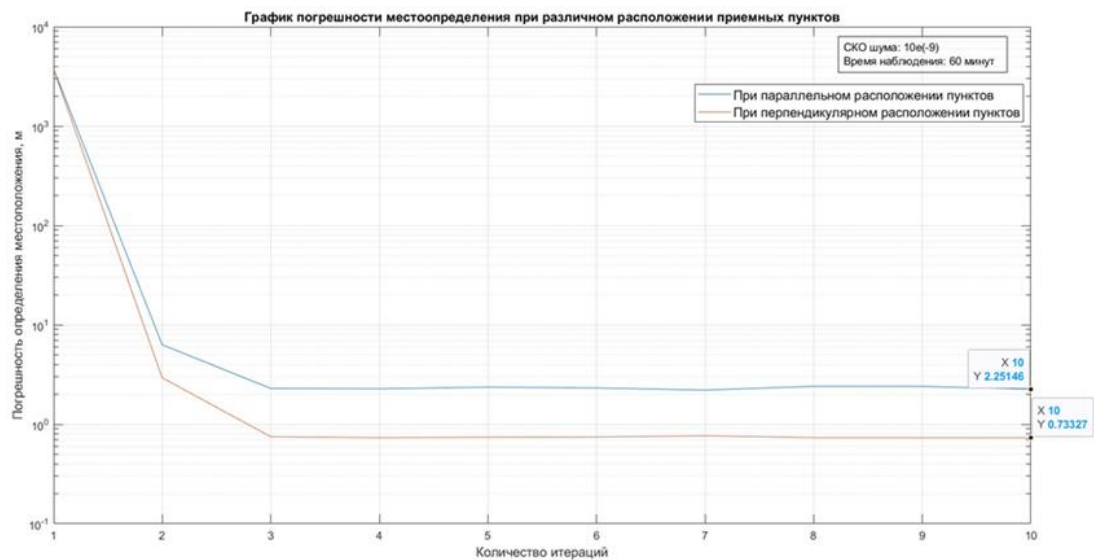


Рис. 12. Погрешность определения фазового центра антенны НКА.

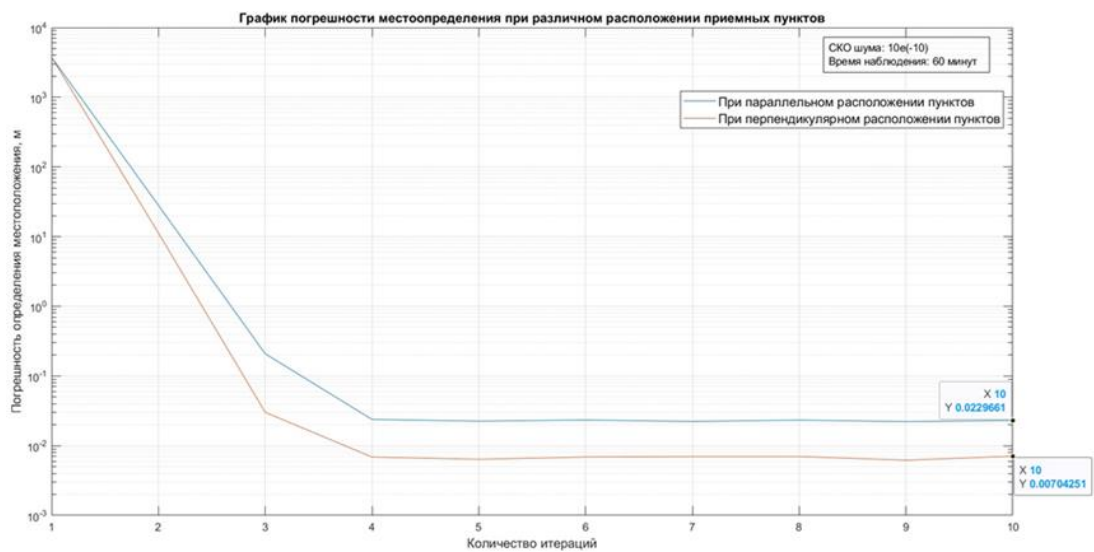


Рис. 13. Погрешность определения фазового центра антенны НКА.

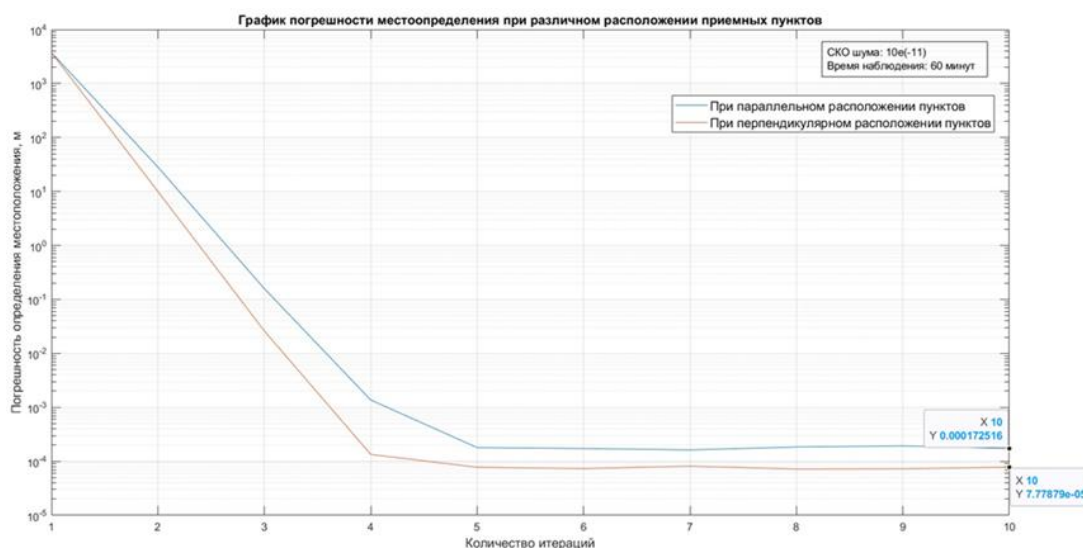


Рис. 14. Погрешность определения координат фазового центра антенны НКА.

Анализ полученных в процессе моделирования результатов исследований позволяет сделать следующие выводы:

- увеличение измерительного интервала способствует повышению точности оценивания координат фазового центра передающей антенны НКА;
- при размещении радиоинтерферометрической базы перпендикулярно следу траектории НКА, точность местоопределения фазового центра растет, что свидетельствует о заметном влиянии геометрического фактора на итоговую точность местоопределения;
- применение технологии радиоинтерферометрии позволяет добиться прецизионной точности (менее единиц сантиметра) привязки фазового центра антенны, что делает целесообразным ее использование для формирования дифференциальных поправок для контрольно-корректирующих станций, входящих в состав функциональных дополнений ГНСС ГЛОНАСС.

Заключение

Результаты проведенного моделирования указывают на возможность решения задачи повышения точности определения фазового центра антенны НКА системы ГЛОНАСС при использовании средств радиоинтерферометрии с перебазирруемыми малогабаритными радиотелескопами. При этом достоинством предлагаемого способа является оперативность решения данной задачи и

возможность формирования измерительной базы «условно» произвольным образом, что обеспечивает возможность управления геометрическим фактором.

Полученные результаты, несмотря на ряд ограничений, позволяют сделать вывод о перспективности и целесообразности дальнейших исследований в области РСДБ-технологий в приложении к решению задач прецизионного координатно-временного обеспечения.

Литература

1. Авдеев В.А., Бахолдин В.С., Гаврилов Д.А. и др. Теоретические основы локации и навигации. Ч. 2. Радиолокационные системы: учебное пособие/– СПб.:ВКА имени А.Ф. Можайского, 2016. – 228 с.
2. Алёшкин А.П. и др. Применение подвижных радиоинтерферометров с длинной базой для повышения устойчивости навигационно-временных определений //Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2017. – Т. 60. – №. 6. – С. 529-537.
3. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии// М.: ФГУП "Картоцентр", 2005.Т.2.360 с.
4. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии // М.: ФГУП "Картоцентр", 2005.Т.1.334 с.
5. Дугин Н.А. и др. Радиоинтерферометр с независимым приемом ННГУ–НИРФИ–Ирбене. Первые результаты //Вестник Нижегородского университета им. НИ Лобачевского. – 2013. – №. 1-1. – С. 79-85.
6. Иванов Д.В. и др. Трехдиапазонная приемная система для радиотелескопов с малыми антеннами //Труды Института прикладной астрономии РАН. – 2013. – №. 27. – С. 197-203.
7. Губин В.А. и др. Основы радионавигационных измерений //М.: МО СССР, 1987.–429 с. – 1987.

8. Макаров А.А., Т.О. Мысливцев Т.О., В.В. Зыбин В.В., М.А. Ковалев М.А., Винник Ю.А. Наземный стационарный приемный пункт 3 класса точности 146763: методическое пособие / СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2013. – 91 с. – 2013.
9. Гаврилов Д.А., Зубарев К.К., Сахно И.В., Суркис И.Ф. Перспективы применения радиоинтерферометрических средств в интересах космических систем дистанционного зондирования Земли. //Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2023. – № 689. – С.27-38.
10. Алешкин А.П., Макаров А.А., Мысливцев Т.О. Предложения по созданию единой шкалы времени на основе совместной обработки данных пространственно-распределенных стандартов частоты //Труды Института прикладной астрономии РАН. – 2016. – №. 37. – С. 19-22.
11. Шебшаевич В.С., Дмитриев П.П., Иванцевич И.В. Сетевые спутниковые радионавигационные системы, изд. 2. – 1993. –408с.

Для цитирования:

Алешкин А.П., Махаев К.Д., Мельничук В.И. Способ уточнения координат фазового центра антенны космического аппарата системы ГЛОНАСС на основе обработки радиоинтерферометрических измерений перебазированных малогабаритных телескопов. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.5.1>