

А. П. АЛЕШКИН, Д. В. ИВАНОВ, В. И. МЕЛЬНИЧУК

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КООРДИНАТНО-ВРЕМЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ ИЗЛУЧЕНИЙ КВАЗАРОВ И НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ В ПЕРЕБАЗИРУЕМОМ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

Предложен способ координатно-временного обеспечения (КВО) потребителей на основе одномоментных измерений параметров сигналов навигационных космических аппаратов глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС и квазаров в радиоинтерферометрических комплексах со сверхдлинной базой, формируемой перебазируемыми малогабаритными радиотелескопами (МРТ), местоположение которых требует уточнения. Использование такого состава источников излучения и возможность миграции МРТ при формировании базы радиоинтерферометра повышают устойчивость процессов КВО. Подход ориентирован на применение средств радиоинтерферометрии для прецизионного позиционирования потребителя по результатам местоопределения и временной привязки МРТ, причем одновременно решается задача координатной привязки базового телескопа. Предполагается, что в создаваемом по такому принципу радиоинтерферометре обе позиции не обладают прецизионной координатной привязкой и шкала времени одного из телескопов, формируемая местным стандартом, требует периодического сличения и коррекции. Предложение может быть полезным для решения задач координатно-временного и навигационного обеспечения специальных потребителей, локация которых характеризуется отсутствием необходимой инфраструктуры.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, навигационные КА, радиоинтерферометрические системы со сверхдлинной базой, позиционирование, малогабаритные радиотелескопы, перебазируемые малогабаритные радиотелескопы, квазары.

Введение

В настоящее время основой позиционирования широкого класса потребителей являются результаты навигационных определений по сигналам глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) ГЛОНАСС [1, 2, 13]. Для повышения устойчивости КВО потребителей в сложных условиях предлагается использовать

Алешкин Андрей Петрович. Доктор технических наук, профессор, кафедра передающих, антенно-фидерных устройств и средств СЕВ, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского (С.-Петербург).
Иванов Дмитрий Викторович. Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, директор, Институт прикладной астрономии РАН (С.-Петербург).

Мельничук Валентин Игоревич. Аспирант, факультет радиоэлектронных систем космических комплексов, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского.

совместный прием и обработку излучения квазаров и навигационных космических аппаратов (НКА) ГЛОНАСС в перебазированных МРТ радиоинтерферометрического комплекса со сверхдлинной базой (РСДБ). Отметим, что сверхдлинную базу не следует понимать, как базу произвольной длины для текущего сеанса измерений: образующие ее МРТ должны одновременно принимать сигналы от некоторого числа одних и тех же источников излучения – НКА и квазаров.

Внедрение этой технологии в настоящее время стало реальным благодаря появившейся технической возможности уменьшить диаметр зеркала антенны МРТ до единиц метров. Однако это неизбежно приводит к снижению эффективной площади антенн и потере усиления и без того слабых сигналов. Особенности решения навигационной задачи КВО удаленных потребителей в сложившейся ситуации, новые подходы к выстраиванию поиска приемлемого по точности решения в пространстве состояний в условиях растущего геометрического фактора рабочего созвездия НКА ГНСС и являются предметом рассмотрения в данной статье.

Анализ возможностей радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой для позиционирования перебазированных МРТ

В качестве альтернативного способа местоопределения потребителя в условиях технически неразвитой инфраструктуры на периферийной локации предлагается задействовать перебазированные МРТ [14–16], использующие интерферометрическую базу с возможностью изменения топологии. Измеряемым параметром радиосигнала служит задержка времени приема излучения от одновременно наблюдаемых НКА ГЛОНАСС и внегалактических источников – квазаров – на одном МРТ относительно другого МРТ. Предлагаемый подход повышает устойчивость навигационных определений потребителя при сохранении требуемой точности позиционирования.

Радиотелескопы больших размеров обеспечивают надежный прием излучения слабых источников, но для решения координатных задач на современном уровне не обладают необходимой скрытностью функционирования. Однако основное препятствие их использованию в качестве альтернативного способа КВО потребителя – невозможность реализации режима функционирования на перебазированных позициях, т.е. при формировании радиоинтерферометрической базы. В связи с этим в последние годы активно разрабатываются конструкции подвижных МРТ, позволяющих применять технологии координатно-временной привязки инфраструктурно необорудованной или требующей уточнения позиции с удаленной локацией.

Неизбежное снижение чувствительности антенн МРТ небольшого диаметра должно быть скомпенсировано определенными техническими решениями в комплексах обработки наблюдений: увеличением полосы пропускания и снижением шумовой температуры фидерных трактов, а также внедрением усовершенствованных алгоритмов обработки наблюдений [3].

В настоящее время в Российской Федерации исследования по разработке перебазированных малогабаритных систем РСДБ активно проводятся в Институте прикладной астрономии РАН [3–5].

Ранее [10] авторами рассматривалось определение положения фазового центра антенны перебазированного ведомого (подвижного) МРТ в произвольной точке земной поверхности по наблюдениям излучения квазаров в РСДБ путем решения

обратной навигационной задачи, причем позиция ведущего (неподвижного) телескопа считалась известной [6–11]. Привлекательность такого подхода заключается в использовании естественных источников радиоизлучения, что повышает устойчивость навигационных определений. Кроме того, зеркальные антенны МРТ характеризуются высокой направленностью, а к выполнению мероприятий КВО не предъявляется критически жестких требований.

Если предложить применение технологии радиоинтерферометрических наблюдений, когда и ведущий и ведомый МРТ могут менять локацию, то естественный прикладной интерес вызовет вопрос достижимой точности позиционирования обоих МРТ в сравнении со стационарным вариантом, для которого отмеченная погрешность характеризуется в ряде ситуаций миллиметровыми значениями [10]. Проведенные авторами исследования по использованию измерений с одним перебазируемым МРТ представлены в работах [10, 16], причем математическое моделирование подтвердило достижимую точность местоопределения фазового центра МРТ со среднеквадратичной погрешностью (СКП) позиционирования, не превышающей 10 см в наихудших условиях.

Вместе с тем для определенных ситуаций, связанных с необходимостью улучшить геометрический фактор в задаче КВО ряда потребителей, например в условиях Арктического региона, нужно обеспечить изменение локации базы радиоинтерферометра. Здесь потребуются одновременное уточнение координат обоих перебазируемых МРТ.

Действительно, в арктической зоне, в широтах выше 75° , устойчивость процесса навигационных определений потребителя ГНСС ГЛОНАСС снижается в связи с особенностями построения орбитальной группировки НКА и недостаточным числом контрольно-корректирующих станций (их невозможно разместить из-за слабо развитой инфраструктуры и природных особенностей региона).

Рассмотрим пути достижения требуемых показателей качества КВО потребителя с учетом отмеченных ограничений. Как подтверждено исследованиями, при использовании принятой модели функции измерений обработка параметров излучения только квазаров позволяет уточнить лишь размер интерферометрической базы, при этом отсутствует наблюдаемость искомого вектора состояния МРТ. В связи с этим предлагается использовать в качестве источника, повышающего информативность измерений, сигналы НКА ГЛОНАСС и, как следствие, совместную обработку измерений параметров сигналов НКА и излучений внегалактических объектов – квазаров.

Математическая модель процесса местоопределения МРТ

Рассмотрим способ уточнения координат перебазируемого МРТ на основе определения разности времени прихода сигналов от одного и более квазаров и НКА к двум МРТ, формирующим в пространстве базу для интерферометрических измерений (рис. 1).

Проводя последовательные РСДБ-наблюдения излучений квазаров и НКА, можем рассчитать текущие координаты обоих МРТ. Зная эти координаты и протяженность интерферометрической базы, можем синхронизировать шкалы стандартов частоты и времени ведомого и ведущего МРТ путем включения значения ухода шкалы времени ведомого МРТ в вектор оцениваемых параметров.

На рис. 1 точки 1, 2, 3 – это позиции МРТ в существующем комплексе «Квазар-КВО» [12], а 4, 5 – позиции, исследованные при моделировании вариантов размещения перебазируемого МРТ.

Излучение от квазара и НКА достигает антенны МРТ, находящейся в позиции 1 (2, 3), с задержкой τ относительно антенны МРТ в позиции 4 (5); τ обусловлена разностью хода $\Delta S = c\tau$, где c – принятая скорость распространения радиоволн.

Задержка τ измеряется корреляционным методом. Зарегистрированные на МРТ 4 (5) и 1 (2, 3) сигналы $S(t)$ и $S(t + \tau)$ обрабатываются в программном корреляторе [3], на выходе которого формируется корреляционная функция, имеющая максимум при значении τ , соответствующем реальной задержке распространения излучения до МРТ 1 (2, 3) относительно МРТ 4 (5). Пример корреляционной функции сигналов $S(t)$ и $S(t + \tau)$ представлен на рис. 2 [17].

Приведем упрощенное математическое описание навигационной функции измерений, выполняемых в РСДБ по квазарам и НКА ГЛОНАСС.

Задержка τ_i распространения излучения от i -го квазара до одного МРТ относительно другого МРТ может быть описана выражением

$$\tau_i = \frac{1}{c} \left(\cos \delta_i ((x_1 - x_2) \cos(\alpha_i - \omega t) + (y_1 - y_2) \sin(\alpha_i - \omega t)) + (z_1 - z_2) \sin \delta_i \right),$$

где ω – угловая скорость вращения Земли; x_1, y_1, z_1 – координаты МРТ 1 (принимаемого за ведущий); x_2, y_2, z_2 – координаты МРТ 2 (принимаемого за ведомый); α_i, δ_i – соответственно углы восхождения и склонения источника излучения.

Записи сигналов на МРТ привязываются к местной шкале времени.

Задержка $t_{\text{НКА}}$ времени распространения излучения от НКА ГЛОНАСС до МРТ 1 и 2 в упрощенном виде может быть представлена следующим соотношением:

$$t_{\text{НКА}} = \frac{1}{c} \left(\sqrt{(x_{\text{НКА}} - x_1)^2 + (y_{\text{НКА}} - y_1)^2 + (z_{\text{НКА}} - z_1)^2} - \sqrt{(x_{\text{НКА}} - x_2)^2 + (y_{\text{НКА}} - y_2)^2 + (z_{\text{НКА}} - z_2)^2} \right),$$

где $x_{\text{НКА}}, y_{\text{НКА}}, z_{\text{НКА}}$ – координаты НКА ГЛОНАСС.

Погрешность местоопределения МРТ ΔR определим по формуле

$$\Delta R = \sqrt{(x_{\text{см}} - x_{\text{ист}})^2 + (y_{\text{см}} - y_{\text{ист}})^2 + (z_{\text{см}} - z_{\text{ист}})^2},$$

где $x_{\text{см}}, y_{\text{см}}, z_{\text{см}}$ – сформированные оценки координат МРТ; $x_{\text{ист}}, y_{\text{ист}}, z_{\text{ист}}$ – истинные координаты МРТ.

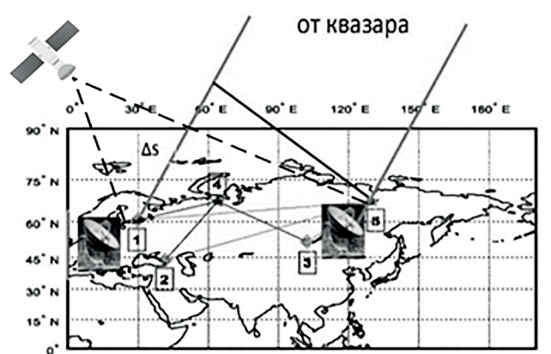


Рис. 1. Пример расположения МРТ РСДБ

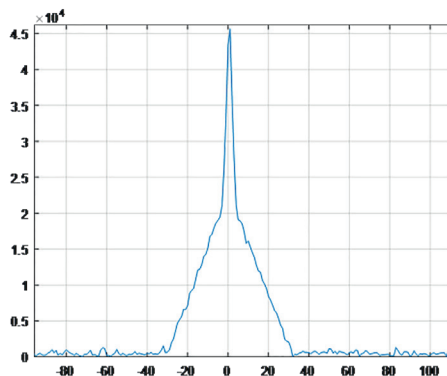


Рис. 2. Пример корреляционной функции сигналов $S(t)$ и $S(t + \tau)$

Для формирования стохастических оценок точности решения навигационной задачи использовался метод статистических испытаний Монте-Карло с 100–1000 реализациями шума в измеряемых параметрах.

Результаты статистического оценивания координат МРТ

Как показали исследования, задача одновременного местоопределения двух МРТ по измерениям параметров излучения только квазаров характеризуется отсутствием наблюдаемости. Для парирования некорректности ее постановки требуется более информативный состав измерений.

На рис. 3 показан график зависимости погрешности местоопределения ΔR_1 одного МРТ по результатам обработки параметров сигналов двух НКА ГЛОНАСС от времени их наблюдения при СКП измерений задержки $\sigma = 10^{-11}$ с. Здесь и далее по оси абсцисс (координата X) отложено время наблюдения квазаров и/или НКА, по оси ординат (координата Y) – погрешность местоопределения одного МРТ (значения ΔR_1 и ΔR_2 имеют фактически один порядок).

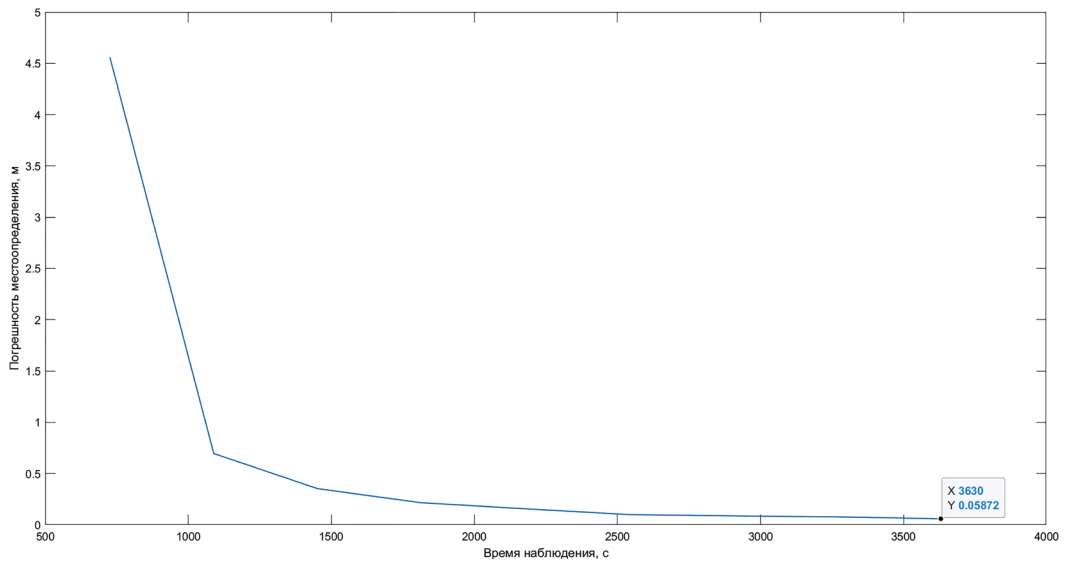


Рис. 3. Погрешность местоопределения МРТ ΔR_1 по результатам обработки сигналов двух НКА системы ГЛОНАСС, $\sigma = 10^{-11}$ с

На рис. 4 изображен график зависимости погрешности местоопределения МРТ ΔR_1 от времени наблюдения по результатам измерений параметров излучения шести квазаров и сигналов НКА ГЛОНАСС ($\sigma = 10^{-11}$ с).

Результаты моделирования показывают, что при использовании совместных измерений параметров сигналов НКА и излучения квазаров итерационный процесс в задаче одновременного уточнения координат для двух МРТ сходится существенно быстрее и с более высокой точностью, которая достигает 2-3 см на часовом интервале наблюдений.

Решить задачу КВО потребителя можно и по сигналам только НКА ГЛОНАСС, однако включение РСДБ-измерений по квазарам позволяет повысить скорость определения координат обоих МРТ или достичь той же точности при меньшем времени наблюдения НКА.

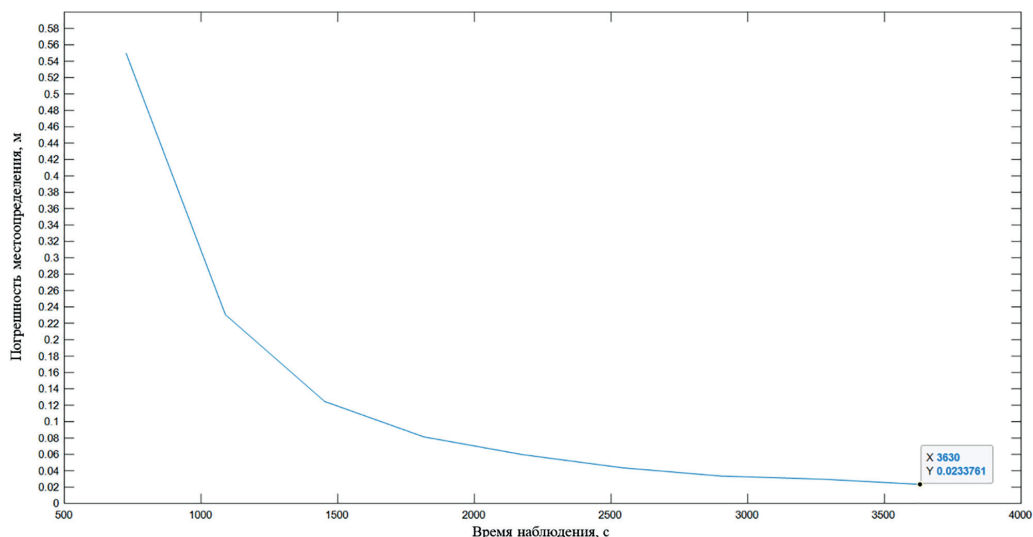


Рис. 4. Погрешность местоопределения МРТ ΔR_1 по наблюдениям параметров излучения шести квазаров и НКА ГЛОНАСС, $\sigma = 10^{-11}$ с

Дополнительно проведено моделирование с систематической (постоянной) погрешностью измерений. Она не позволяет учесть реальные свойства меняющихся погрешностей радиотехнических измерений, таких как ионосферные и тропосферные задержки, погрешности знания эфемерид НКА, но обеспечивает более адекватную оценку точности местоопределения.

На рис. 5 представлена зависимость погрешности местоопределения от времени наблюдения по результатам измерений МРТ параметров сигналов двух НКА ГЛОНАСС при СКП $\sigma = 10^{-10}$ с и с остаточной систематической погрешностью измерения дальности в диапазоне от 0 до 10 см.

На рис. 6 дан график аналогичной зависимости ΔR_1 для МРТ по результатам совместных измерений параметров излучения шести квазаров и сигналов двух НКА ГЛОНАСС.

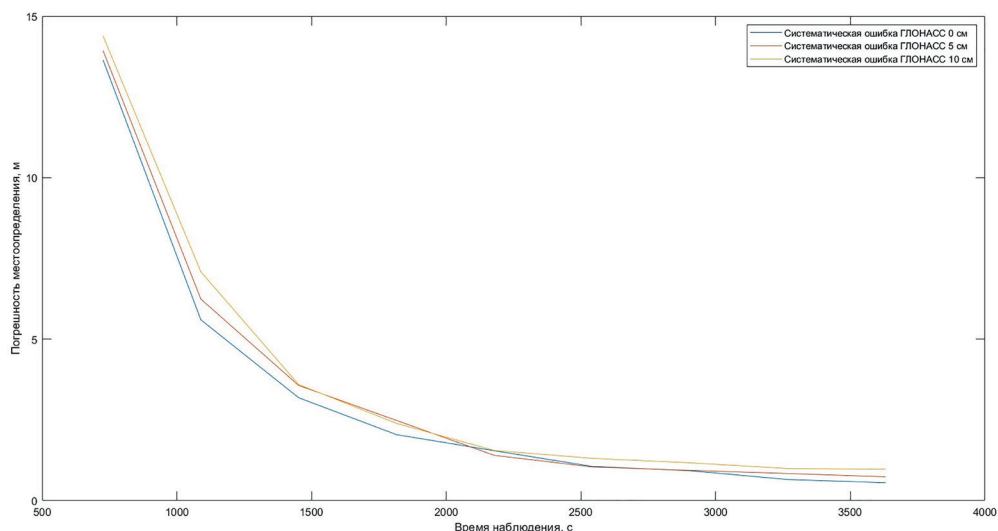


Рис. 5. Погрешность местоопределения МРТ по сигналам двух НКА ГЛОНАСС с систематической погрешностью измерений

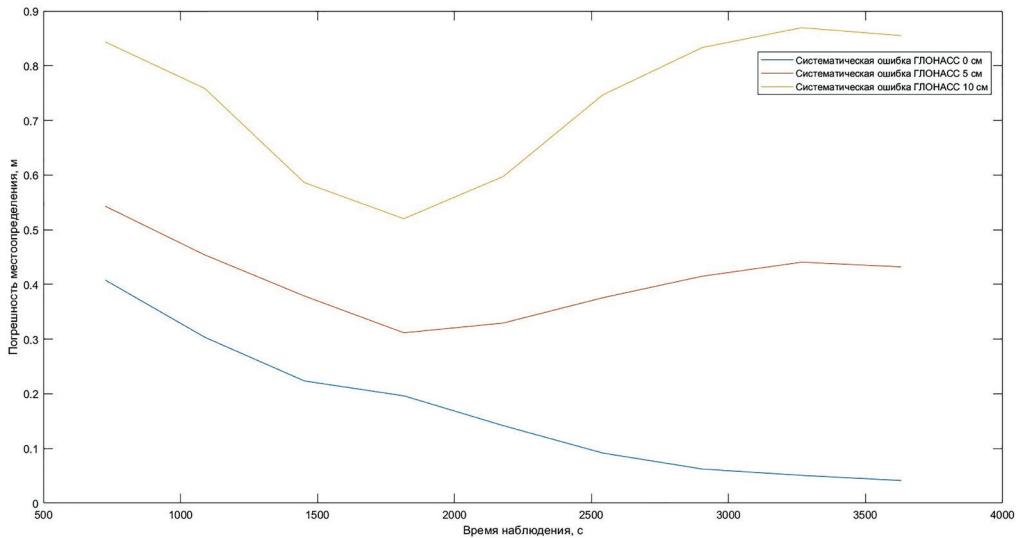


Рис. 6. Погрешность местоопределения МРТ ΔR_1 по наблюдениям шести квазаров и сигналов двух НКА ГЛОНАСС с учетом систематической погрешности измерений

Как видно из рис. 5 и 6, если учесть систематическую погрешность измерения дальности до НКА в абсолютных значениях до 10 см, погрешности местоопределения координат обоих МРТ с помощью сигналов двух НКА ГЛОНАСС и шести квазаров не превышают 1 м при интервале наблюдения от 726 до 3630 с (в отличие от использования только сигналов НКА).

В ходе проведенных исследований авторами разработан программно-моделирующий комплекс, где реализуются алгоритмы одновременного КВО обоих МРТ по РСДБ-наблюдениям излучения внегалактических источников и НКА ГЛОНАСС. Комплекс позволяет проводить сравнительную оценку точности местоопределения потребителей при различном составе исходных измерительных данных.

Заключение

Проведен сравнительный анализ способов КВО потребителей по смоделированным наблюдениям излучения квазаров и сигналов НКА ГЛОНАСС, осуществленным перебазируемыми МРТ РСДБ.

Результаты моделирования показывают, что предложенный способ КВО с помощью радиоинтерферометрических измерений параметров сигналов НКА и излучения квазаров обеспечивает устойчивое уточнение позиций перебазируемых МРТ РСДБ на относительно непродолжительных временных интервалах.

Преимущество способа состоит в более высокой надежности процесса местоопределения потребителей в сравнении с ГНСС-позиционированием. Важным перспективным направлением исследований является поиск путей парирования систематических погрешностей измерений, в частности с использованием наблюдений дополнительных МРТ.

Имитационное математическое моделирование показало, что для среднестатистических условий проведения РСДБ-наблюдений погрешность оперативного пози-

ционирования МРТ и, соответственно, потребителя не превышает единиц дециметров. Такой точности вполне достаточно для большинства ситуаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. Т. 1. М.: Картоцентр, 2005. 334 с.
2. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. Т. 2. М.: Картоцентр, 2005. 360 с.
3. Иванов Д.В., Мардышкин В.В., Лавров А.С., Евстигнеев А.А. Трехдиапазонная приемная система для радиотелескопов с малыми антеннами // Труды ИПА РАН. 2013. Вып. 27. С. 197–201.
4. 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 ИПА РАН. 2016. Вып. 37. С. 19–22.
5. Дугин Н.А., Гавриленко В.Г., Антипенко А.А., Дементьев А.Ф., Нечаева М.Б., Тихомиров Ю.В., Калинин А.В., Чагунин А.К. Радиоинтерферометр с независимым приемом ННГУ – НИРФИ – Ирбене. Первые результаты // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2013. № 1(1). С. 79–85.
6. Шебшаевич В.С., Дмитриев П.П., Иванцевич Н.В. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / ред. В.С. Шебшаевич. М.: Радио и связь, 1993. 408 с.
7. Дулевич В.Е. Теоретические основы радиолокации: учеб. пособие для вузов / ред. В.Е. Дулевич. 2-е изд. М.: Сов. радио, 1978. 608 с.
8. Губин В.А., Клюев Н.Ф., Костылев А.А., Мельников Б.Г., Степанов М.Г., Ткачев Е.А. Основы радионавигационных измерений. М.: МО СССР, 1987. 430 с.
9. Айвазян С.А. Прикладная статистика. Основы эконометрики. Т. 2. М.: Юнити-Дана, 2001. 432 с.
10. Алешкин А.П., Макаров А.А., Иванов Д.В., Ипатов А.В. Применение подвижных радиоинтерферометров с длинной базой для повышения устойчивости навигационно-временных определений // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 6. С. 529–537. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-6-529-537.
11. Параметры земли 1990 года (ПЗ-90.11): справочный документ. М.: ВТУ ГШ ВС РФ, 2014. 52 с.
12. Макаров А.А., Мысливцев Т.О., Зыбин В.В., Ковалев М.А., Винник Ю.А. Наземный стационарный приемный пункт 3 класса точности 146763: метод. пособие. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. 91 с.
13. Модули первого поколения ГНСС ГЛОНАСС/GPS – 1К-161, К-161. URL: <https://rirt.ru/products/moduli-pervogo-pokoleniya-gnss-glonas> (дата обращения: 08.07.2025).
14. Иванов Д.В., Ипатов А.В., Гаязов И.С., Зотов М.Б., Мельников А.Е., Стэмповский В.Г., Суркис И.Ф., Чернов В.К. Оценка возможности использования малогабаритных РСДБ систем для решения задач КВНО // ИПА РАН. Доклады на конференцию КВНО-2017 (17–21 апреля 2017 г., Санкт-Петербург).
15. National Institute of Information and Communications Technology. URL: <http://www.nict.go.jp/en/index.html> (дата обращения: 08.07.2025).
16. Алешкин А.П., Зубарев К.К., Иванов Д.В., Макаров А.А. Способ координатно-временного обеспечения удаленных потребителей на основе мобильной радиоинтерферометрии // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. № 1(108). С. 54–65. DOI: 10.17285/0869-7035.0022.
17. 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. Вып. 689. С. 27–37.

Aleshkin, A.P. (Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia), **Ivanov, D.V.** (Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia), **and Mel'nichuk, V.I.** (Mozhaisky Military Space Academy).

Study of the Possibility to Provide Position, Navigation and Timing Service to Users by Processing Signals from Quasars and Navigation Satellites in a Relocatable Radio Interferometer. *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2025, vol. 33, no. 2 (129), pp. 122–130.

Abstract. A method is proposed for position, navigation and timing (PNT) support based on instant measurements of parameters of signals from the global navigation satellite system GLONASS and quasars in radio interferometric systems with ultra-long baseline formed by relocatable small-sized radio telescopes (SRT) whose location is to be updated. This composition of signal sources and the possibility to relocate the SRT to form the radio interferometer's baseline increase the PNT process stability. The proposed approach relies upon the radio interferometry used for precision positioning of a user according to the measured coordinates and the PNT time reference, with simultaneous coordinate referencing of the base telescope. It is assumed that in the radio interferometer formed in this manner, both positions do not have precision coordinate references, and the time scale of one of the telescopes, formed by the local standard, needs to be matched and updated regularly. This method can be useful when providing the PNT support to special users whose location has no essential infrastructure.

Key words: GLONASS, navigation spacecraft, radio interferometric systems with ultra-long baseline, positioning, small-sized radio telescopes (SRT), relocatable SRT, quasars.

Материал поступил 22.11.2024