
ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 521.9, 529.7
DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-6-529-537

ПРИМЕНЕНИЕ ПОДВИЖНЫХ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРОВ С ДЛИННОЙ БАЗОЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ НАВИГАЦИОННО-ВРЕМЕННЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

А. П. АЛЁШКИН¹, А. А. МАКАРОВ¹, Д. В. ИВАНОВ², А. В. ИПАТОВ²

¹Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: almakand@mail.ru

²Институт прикладной астрономии РАН, 191187, Санкт-Петербург, Россия

Рассматривается перспективный подход к повышению качества координатно-временного и навигационного обеспечения за счет прямых определений координат и ухода шкал времени часов произвольного потребителя на протяженной территории РФ и за ее пределами. Предлагается при формировании измерительной базы в качестве опоры использовать одну из трех стационарных радиоинтерферометрических станций комплекса „Квazar-КВО“ с точно известными координатами, а в качестве второй — передвижные станции радиоинтерферометрических комплексов с длинной базой (ПС-РСДБ) с уточняемыми координатами. Предложена структурная схема ПС-РСДБ и приведены основные параметры радиотелескопа. Представлена зависимость реализуемого ПС-РСДБ отношения сигнал/шум как функции шумовой температуры системы для двух значений потоков источников и нескольких значений времени накопления.

Ключевые слова: РСДБ, КВНО, системы координат, сличение шкал времени

Использование высокоточного координатно-временного и навигационного обеспечения (КВНО) во многом определяет не только уровень инновационного развития практически всех отраслей промышленности, транспорта, разведки полезных ископаемых, мониторинга зданий и крупных сооружений, предотвращения природных и техногенных катастроф, но и обороноспособность страны. От состояния и развития методов и средств КВНО в значительной степени зависит эффективность применения вооружения и военной техники как регионального, так и глобального назначения. В основе КВНО лежат фундаментальные знания и прямой доступ к координатно-временным системам отсчета (КВСО) наземного и космического базирования.

КВСО космического базирования реализуется Глобальной навигационной спутниковой системой (ГЛОНАСС), которая широко используется для морского, наземного и воздушного позиционирования разнообразных потребителей, включая наземное и космическое вооружение РФ [1]. КВСО наземного базирования реализуется в нашей стране на основе радиоинтерферометрического комплекса „Квazar-КВО“, состоящего из трех радиоинтерферометрических станций со сверхдлинными базами (РСДБ): „Светлое“, „Зеленчукская“ и „Бадары“ [2, 3]. Указанные станции ведут наблюдение по международным программам и участвуют в процессе уточнения опорных систем координат на небе (International Celestial Reference Frame, ICRF) и на поверхности Земли (International Terrestrial Reference Frame, ITRF), а также используются

для непрерывного мониторинга параметров ориентации Земли (ПОЗ) службой IERS (International Earth Rotation Service). Начиная с 2005 г. „Квазар-КВО“ выполняет самостоятельные регулярные РСДБ-наблюдения с целью оперативного определения координат земного полюса и всемирного времени для нужд отечественного КВНО. Однако ресурсы комплекса этим не ограничиваются.

Целесообразно исследовать возможности определения координат и ухода шкал времени (ШВ) любого потребителя на территории РФ и за ее пределами в системе КВСО „Квазар-КВО“ с помощью передвижных станций РСДБ (ПС-РСДБ). Зарубежный опыт показывает, что такие измерения могут обеспечить точность местоопределения по координатам порядка 1 см и по времени 0,1 нс за сутки [4, 5].

Основное назначение ПС-РСДБ состоит в распространении на территории России фундаментальной КВСО наземного базирования, задаваемой геоцентрическими координатами и шкалой группового хранителя атомного времени комплекса „Квазар-КВО“. Представляется важным оценить возможность с помощью совместного использования РСДБ и ПС-РСДБ [6]:

- а) определять положение ПС-РСДБ в системе координат комплекса „Квазар-КВО“;
- б) сличать шкалу атомного времени ПС-РСДБ со шкалой группового хранителя станций комплекса „Квазар-КВО“ и использовать результаты сличения для коррекции ШВ кооперируемых потребителей.

Применение ПС-РСДБ совместно с комплексом „Квазар-КВО“, с одной стороны, улучшает геометрию активно функционирующей части геодезической сети РФ и повышает точность координатно-временных и навигационных определений, а с другой — обеспечивает привязку координат наблюдательных пунктов этой сети к Международной земной системе координат. Следует также учитывать, что такие наблюдения проводятся по естественным неуничтожаемым источникам радиоизлучения, это повышает функциональную устойчивость РСДБ по сравнению с работой по искусственным радиоисточникам.

Создание ПС-РСДБ согласуется с концепцией развития РСДБ на основе антенн малого диаметра. В настоящее время такими антеннами оснащаются стационарные наблюдательные пункты комплекса „Квазар-КВО“, а в будущем подобными антеннами могут быть оборудованы пункты Государственной системы единого времени и эталонных частот „Цель“ для оперативного определения всемирного времени, а также региональные узлы магистральных линий связи для высокоточной синхронизации первичных опорных генераторов высокоскоростных волоконно-оптических линий передачи информации. С целью повышения точности координатно-временной информации и оперативности ее доставки Институтом прикладной астрономии РАН ведутся разработки по созданию системы фундаментального КВНО страны и Вооруженных Сил на основе совместного использования (колокации) различных измерительных средств современной космической геодезии — РСДБ, квантово-оптических систем, беззапросных измерительных станций и ПС-РСДБ. Комплексное использование оптических и радиотехнических методов и систем в отечественных и международных программах позволит создать высокоточные опорные системы координат на Земле и в стратегической космической зоне, определять текущие параметры их взаимной ориентации, осуществлять функциональную поддержку системы ГЛОНАСС и других систем КВНО. Таким образом, ПС-РСДБ позволит успешно решать задачи:

- создания национальной высокоточной геодезической сети, ее привязки к глобальной геоцентрической системе координат ITRF;
- повышения точности геодезической привязки специальных комплексов к национальной геодезической сети;
- повышения точности и оперативности определения параметров ориентации Земли;

- повышения точности решения навигационных и баллистических задач;
- синхронизации стандартов времени и частоты систем единого времени.

Новизна выполняемых исследований состоит в разработке:

- концепции создания и применения ПС-РСДБ в интересах КВНО системы ГЛО-НАСС, объектов вооружения, военной техники и народного хозяйства;
- технологий получения координатно-временной и навигационной информации методом радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами с использованием передвижных станций РСДБ;
- методики распространения координатно-временной основы комплекса „Квазар-КВО“ на опорные пункты, находящиеся как на территории РФ, так и за ее пределами.

Внедрение результатов исследований позволит обеспечить навигационную систему ГЛО-НАСС и ВС РФ высокоточной координатно-временной и навигационной информацией, необходимой для повышения точности наземной, морской и воздушной навигации и глобального применения систем высокоточного оружия, межконтинентальных баллистических и крылатых ракет, средств противоракетной и воздушно-космической обороны, а также противоспутниковой борьбы.

Основными потребителями информации ПС-РСДБ являются опорные пункты системы геоцентрических координат ГСК-2011 [7], опирающейся на космическую геодезическую сеть (КГС) МО РФ. Как видно из рис. 1, пункты КГС равномерно покрывают всю территорию РФ как в широтном, так и долготном направлении, к ним имеется доступ, по крайней мере, с помощью одного из основных видов транспорта — автомобильного, железнодорожного, речного, морского или воздушного. Другими потребителями ПС-РСДБ являются пункты Фундаментальной астрономо-геодезической сети, объекты размещения групповых хранителей атомной шкалы времени (Государственный эталон времени и частоты и эталоны-копии), а также районы повышенной сейсмической опасности.

Фундаментальные станции крайне неравномерно распределены по территории России, и их число невелико. Глобальная геодезическая сеть требует однородного распределения опорных точек, в противном случае систематические ошибки ухудшают результаты позиционирования. Для улучшения топологии распределения фундаментальных станций в глобальной сети предлагается концепция ПС-РСДБ.

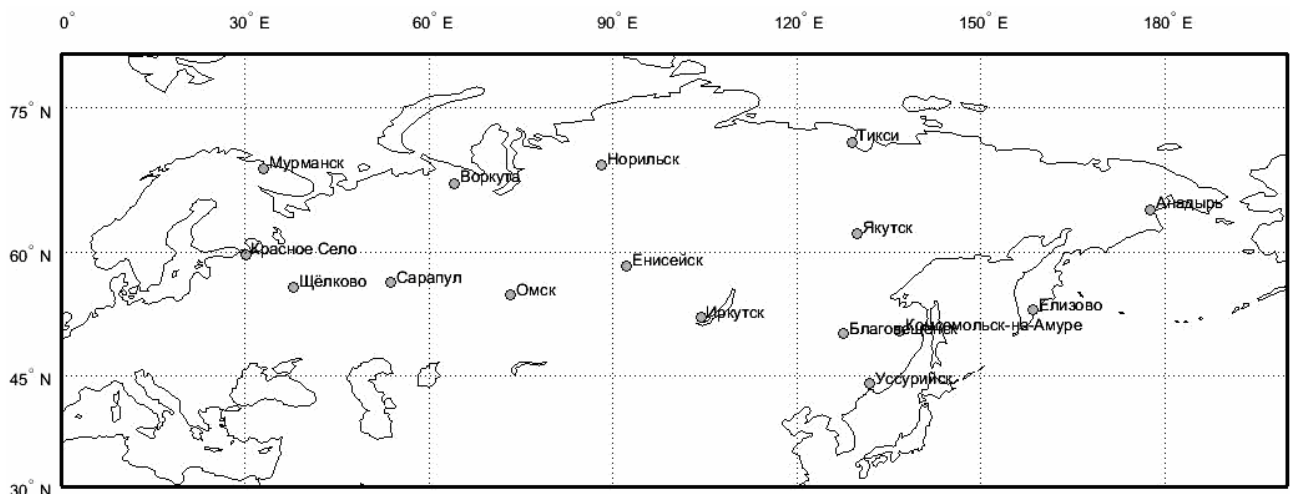


Рис. 1

ПС-РСДБ можно условно разделить на мобильные и транспортабельные.

Мобильные станции чаще всего имеют военное или специальное назначение (требуется оперативное и/или скрытое позиционирование). Они монтируются на автомобильных прицепах и могут быстро приводиться в рабочее состояние. Время их работы ограничено

несколькими сутками. Такие станции оборудуются малыми антеннами (диаметр 3—5 м).

Транспортабельные станции предназначены для более длительного использования в удаленных и труднодоступных местах. Они доставляются железнодорожным и/или морским транспортом, а на заключительном этапе — автомобильными трейлерами или вертолетами. По прибытии антенна собирается и устанавливается на заранее подготовленное место на твердом грунте, а контейнеры переоборудуются под лабораторные и жилые помещения. Диаметр антенн таких станций составляет от 2,4 до 9 метров. Работают они на одном месте от нескольких недель до нескольких лет. Их задача с максимальной точностью определить координаты и скорость тектонических смещений. Такие определения в составе региональной или глобальной сети РСДБ позволяют включать геодезические маркеры этих станций в состав ITRF.

Как правило, данные РСДБ-наблюдений состоят из оцифрованного шума квазаров и записываются вместе с метками времени на носитель информации. По окончании измерений носители поступают на РСДБ-коррелятор. В процессе корреляционной обработки осуществляется поиск максимума взаимокорреляционной функции. Выходными данными коррелятора являются амплитуда и фаза корреляционных лепестков, из которых будут получены задержки времени приема сигнала одним радиоинтерферометром относительно другого и скорости изменения указанных задержек.

Поскольку апертура антенн ПС-РСДБ меньше апертуры антенн фундаментальных станций, важной задачей является парирование потерь в мощности принимаемого сигнала. Увеличение отношения сигнал/шум (SNR) зарегистрированного сигнала в РСДБ обеспечивает:

- пропорциональное повышение точности определения задержек,
- возможность использования коротких сканов (важно для получения большего количества сканов за день),
- возможность наблюдения слабых источников (важно для выбора позиционно стабильных источников и достижения более равномерного распределения источников по небесной сфере).

Выбор величины SNR, реализуемого в системе регистрации, основан на слабейших источниках, которые необходимо наблюдать. Отношение сигнал/шум представляет собой функцию диаметра антенны D , коэффициента использования поверхности (КИП), шумовой температуры системы (T_c), полосы регистрации и времени интегрирования. Стоимость радиотелескопа (РТ) увеличивается пропорционально кубу диаметра его антенны, поэтому выбор между диаметром антенны и значением SNR сводится к выбору между стоимостью радиотелескопа и его функциональными возможностями.

Расчеты производились по следующей формуле:

$$\text{SNR} = \frac{\pi f S \cdot 10^{-26} D_1 D_2}{8k} \sqrt{\frac{\text{КИП}_1 \text{КИП}_2}{T_{c1} T_{c2}}} \sqrt{2f\tau},$$

где $f=0,88$ — фактор обработки для 2-битового квантования; S — поток источника; k — постоянная Больцмана; $\Delta f=500$ МГц — полоса обработки (для РТ с $D_2=32$ м, далее РТ-32); $\tau=10$ с — время накопления; $\text{КИП}=0,6$ для потоком 0,5 Ян обеих антенн (для РТ-32 КИП по X -диапазону); $T_c=50$ К (для РТ-32 по X -диапазону).

На рис. 2 представлен график зависимости SNR РТ-32 от T_c для источника с потоком 1 (а) и 0,5 Ян (б) при разных диаметрах компактной антенны.

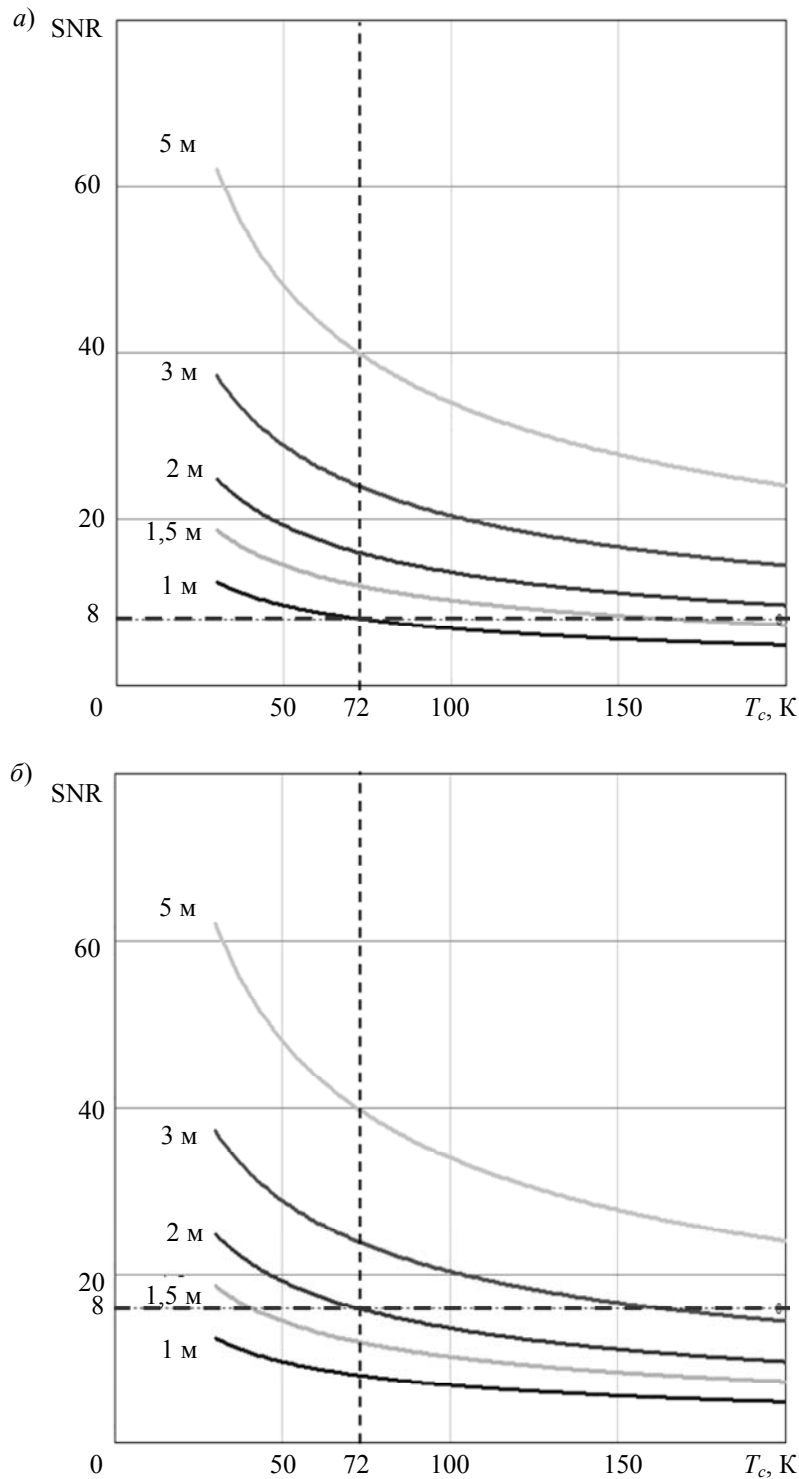


Рис. 2

Стоит отметить, что минимальное значение SNR на выходе коррелятора для различия отклика на фоне шумов равно должно быть равно 8.

Зависимость SNR от шумовой температуры системы „компактная антенна—РТ-32“ при различных временах накопления и потоках источника представлена на рис. 3 (*a* — компактная антенна 1 м, *б* — 2 м). Температуру системы 70 К вполне реально достичь, используя криосистемы Стирлинга с охлаждением МШУ до 40 К. В этом случае в паре с РТ-32 можно использовать 1 м компактную антенну и различать на выходе коррелятора радиоисточники с потоком 1 Ян при времени накопления от 10 с.

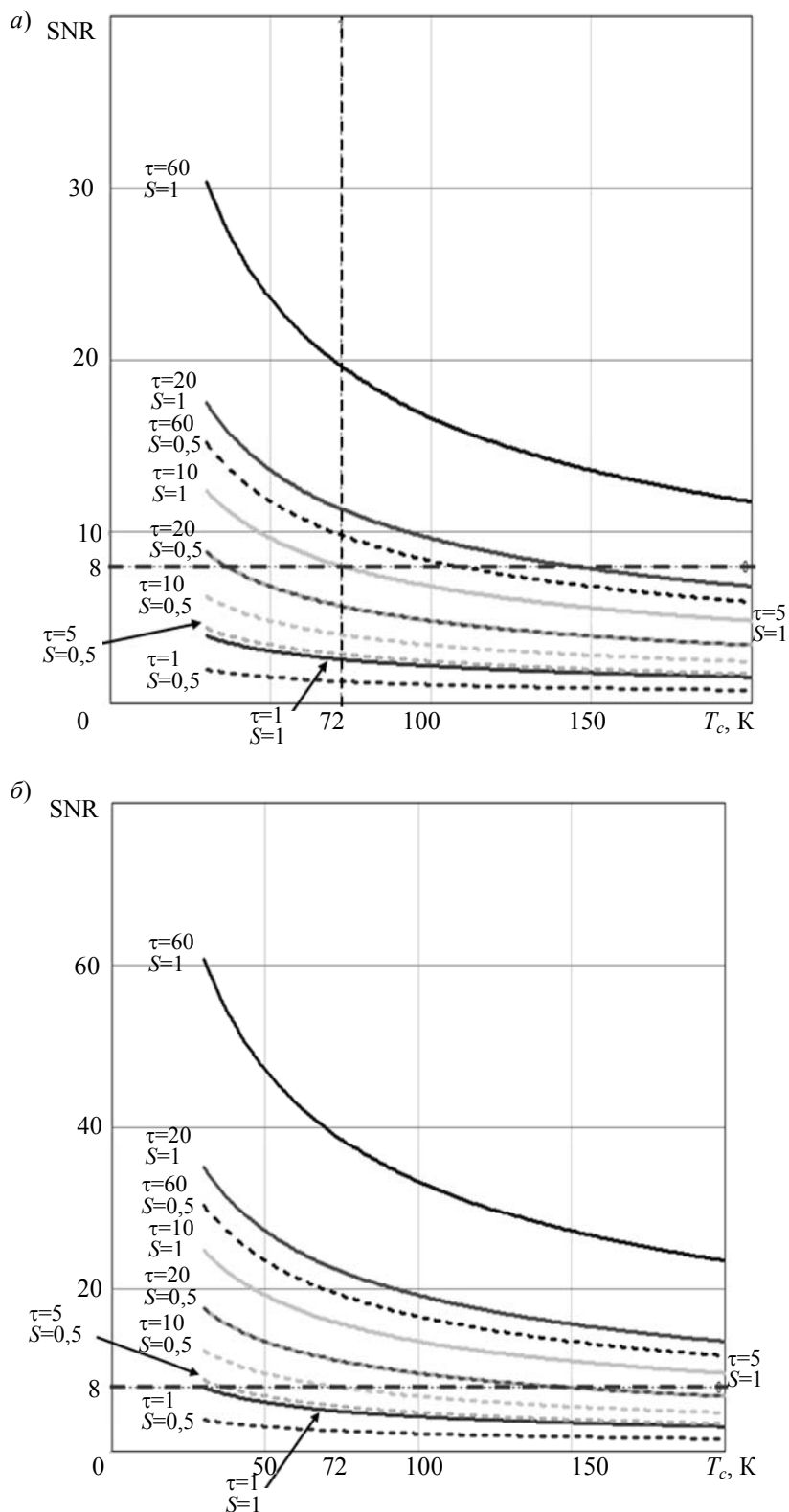


Рис. 3

Предлагаемая ПС-РСДБ содержит (рис. 4): радиотелескоп (включающий антенную систему и приемный комплекс), аппаратуру GPS/ГЛОНАСС, стандарт частоты и времени, метеостанцию, станцию спутниковой связи.

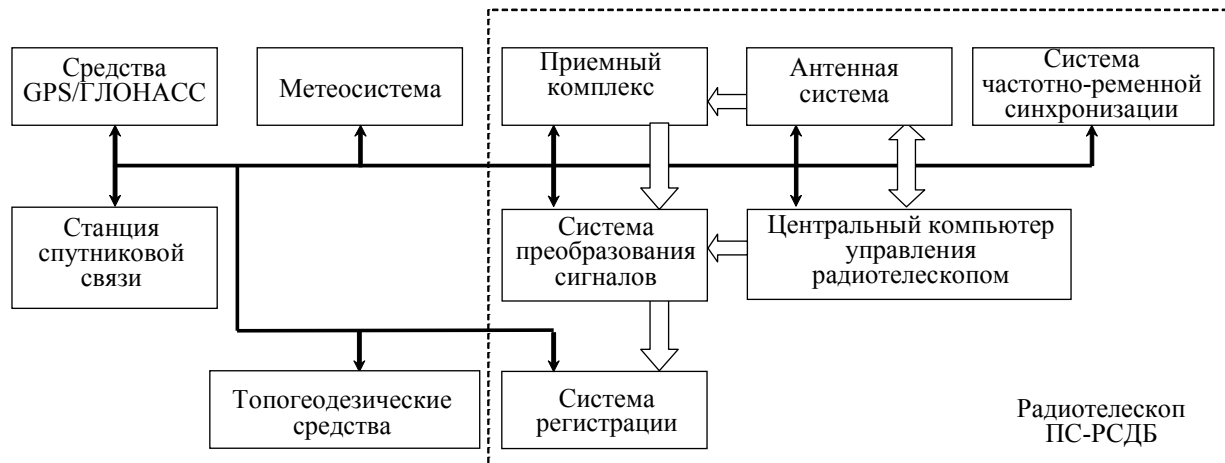


Рис. 4

Основные параметры радиотелескопа ПС-РСДБ представлены ниже.

Диаметр зеркала, м.....	5—7
Погрешность изготовления поверхности, мм.....	±0,2
X-приемник (8,4 ГГц; 3,5 см), ГГц.....	8,18—9,08
Эквивалентная шумовая температура системы в X-диапазоне, К.....	50
КИП в X-диапазоне.....	0,7
S-приемник (2,3 ГГц; 13 см), ГГц.....	2,15—2,50
Эквивалентная шумовая температура системы в S-диапазоне, К.....	50
КИП в S-диапазоне.....	0,7

На ПС-РСДБ устанавливаются два водородных стандарта и приемник GPS/ГЛОНАСС для синхронизации времени. Один водородный стандарт является опорным. Через определенный интервал времени ШВ должна корректироваться. Разность показаний ШВ ПС-РСДБ и GPS/ГЛОНАСС будет отправляться в Государственную службу времени, частоты и определения параметров вращения Земли.

ПС-РСДБ должна иметь полный комплект датчиков — температуры, влажности, давления, скорости и направления ветра, а также дождемер; параметры погоды регистрируются каждые 15 минут. Эти же данные используются для коррекции рефракции во время наведения.

Топогеодезические средства ПС-РСДБ с различным геодезическим оборудованием связывают опорные точки телескопов и фазовые центры в единую сеть. Пространственные векторы между опорными точками делают возможным организацию связи между различными геодезическими устройствами. Периодические повторения измерений в топогеодезической сети обеспечивают стабильность платформы ПС-РСДБ относительно ее локального окружения. Для этой цели должны быть изготовлены специальные реперы на платформе ПС-РСДБ. Региональная стабильность контролируется приемниками GPS/ГЛОНАСС.

Моделирование процесса местоопределения ПС-РСДБ выполнено путем решения обратной задачи с использованием метода наименьших квадратов. Преимуществами этого подхода являются простота и быстрота расчета: при наличии высокого геометрического фактора требуется всего около 2,3 итераций для нахождения координат. При времени наблюдения 120 с и дисперсии шума 10^{-12} с оценка формируется уже на второй итерации. Результаты моделирования показывают, что этот метод позволяет получить приемлемое по точности решение на непродолжительных временных интервалах наблюдения и при малой интенсивности шума. При увеличении СКО шума итерационный процесс поиска решения может расходиться.

Эмпирическое уточнение координат ПС-РСДБ может быть выполнено путем прямого поиска решения. Для нахождения минимума используется симплексный метод прямого поиска

Нелдера—Мида [8]. К недостаткам этого способа можно отнести значительное увеличение времени получения оценки.

Таким образом, реализация технологии ПС-РСДБ представляется важнейшим направлением развития фундаментального КВНО. Ее применение позволит повысить как точностные характеристики, так и устойчивость системы КВНО в целом благодаря использованию стабильного радиоизлучения источников естественного происхождения. Предлагаемая технология органично вписывается в концепцию развертывания сети наземных реперных источников координатно-временного обеспечения и специальной информационной поддержки. В условиях, требующих повышения точности и автономности функционирования глобальных спутниковых навигационных систем, развертывание на протяженной территории России и дружественных государств сетевой структуры для распространения навигационных, временных и специальных сигналов существенно повысит стратегические качественные характеристики и возможности функционирования широкого класса потребителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приказ Минпромторга от 28 июля 2015 г. № 2123 России „Радионавигационный план Российской Федерации“.
2. Васильев М. В., Зимовский В. Ф., Ильин Г. Н., Маршалов Д. А., Мельников А. Е. и др. Радиотехнические наблюдения космических аппаратов на базе средств РСДБ-комплекса „Квазар-КВО“ // Тез. докл. 6-й Всерос. конф. „Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение“ (КВНО-2015). СПб: ИПА РАН, 2015. С. 34.
3. Ипатов А. В., Иванов Д. В., Ильин Г. Н., Гаязов И. С., Смоленцев С. Г. и др. Российская РСДБ-сеть проекта VGOS // Тез. докл. 6-й Всерос. конф. „Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение“ (КВНО-2015). СПб: ИПА РАН, 2015. С. 60—61.
4. Whitney A. R. The Mark 5 VLBI Data System // Proc. of the 18th VLBI for Geodesy and Astrometry Working Meeting, April 2007, Vienna. P. 33—38.
5. Petrachenko B., Corey B., Himwich E., Ma Ch., Malkin Z., Niell A., Shaffer D., Vandenberg N. Final Report of the Observing Strategies Sub-Group of IVS working Group 3: VLBI2010 // VLBI2010: Current and Future Requirements for Geodetic VLBI Systems. 2005.
6. Вытнов А. В., Иванов Д. В. Модернизация хранителей времени и частоты РСДБ комплекса „Квазар-КВО“ // Тр. Института прикладной астрономии РАН. 2009. Вып. 19.
7. Постановление от 28 декабря 2012 г. №1463 „О единых государственных системах координат“.
8. Алёшкин А. П. Основы теории адаптивного смещенного оценивания с нелинейными ограничениями и ее применение к решению некорректных навигационных задач. СПб: ВИКУ, 2001. 153 с.

Сведения об авторах

- Андрей Петрович Алёшкин** — д-р техн. наук, профессор; ВКА им. А. Ф. Можайского; кафедра передающих, антенно-фидерных устройств и средств СЕВ;
E-mail: a_aleshkin@mail.ru
- Андрей Александрович Макаров** — канд. техн. наук, докторант; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра передающих, антенно-фидерных устройств и средств СЕВ;
E-mail: almakand@mail.ru
- Дмитрий Викторович Иванов** — канд. физ.-мат. наук; Институт прикладной астрономии Российской академии наук; заместитель директора по научной работе;
E-mail: dvi@iaaras.ru
- Александр Васильевич Ипатов** — д-р техн. наук, профессор; Институт прикладной астрономии Российской академии наук; директор; E-mail: ipatov@iaaras.ru

Рекомендована кафедрой
передающих, антенно-фидерных
устройств и средств СЕВ

Поступила в редакцию
19.08.16 г.

Ссылка для цитирования: Алёшкин А. П., Макаров А. А., Иванов Д. В., Ипатов А. В. Совершенствование координатно-временного и навигационного обеспечения по пути разработки технологии применения передвижных радиointерферометрических комплексов с длинной базой // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 6. С. 529—537.

THE USE OF MOBILE LONG-BASE RADIO INTERFEROMETERS TO IMPROVE STABILITY OF NAVIGATION AND TIME MEASUREMENTS

A. P. Aleshkin¹, A. A. Makarov¹, D. V. Ivanov², A. V. Ipatov²

¹*A. F. Mozhaisky Military Space Academy, 197198, St. Petersburg, Russia
E-mail: almakand@mail.ru*

²*Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, 191187, St. Petersburg, Russia*

A perspective approach to the problem of improvement of coordinate-time and navigation support by direct measurement of coordinates and departure of the clock for an arbitrary consumer throughout the territory of Russia and abroad is considered. Application of coordinate-time reference systems using mobile VLBI stations with known precise coordinates is proposed.

Keywords: VLBI, CTNP, coordinate systems, comparison of time scales

Data on authors

- Andrey P. Aleshkin** — Dr. Sci., Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Transmission, Antenna-Feeder Devices, and UTS Means;
E-mail: a_aleshkin@mail.ru
- Andrey A. Makarov** — PhD, Doctoral Candidate; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Transmission, Antenna-Feeder Devices, and UTS Means;
E-mail: almakand@mail.ru
- Dmitry V. Ivanov** — PhD; Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences; Deputy Director for R&D; E-mail: dvi@iaaras.ru
- Alexander V. Ipatov** — Dr. Sci., Professor; Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences; Director; E-mail: ipatov@iaaras.ru

For citation: Aleshkin A. P., Makarov A. A., Ivanov D. V., Ipatov A. V. The use of mobile long-base radio interferometers to improve stability of navigation and time measurements. *Journal of Instrument Engineering*. 2017. Vol. 60, N 6. P. 529—537 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-6-529-537