

А. П. АЛЁШКИН, К. К. ЗУБАРЕВ, Д. В. ИВАНОВ, А. А. МАКАРОВ

СПОСОБ КООРДИНАТНО-ВРЕМЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УДАЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МОБИЛЬНОЙ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Выполнен сравнительный анализ способов координатно-временного обеспечения удаленного потребителя, основанный на результатах измерений навигационного приемника сигналов глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС и наблюдений излучения квазаров в малогабаритных радиоинтерферометрических системах с длинной базой (РСДБ). Использование измерений радиотелескопов позволяет повысить устойчивость координатно-временного и навигационного обеспечения потребителей, поскольку при этом фиксируется радиоизлучение источников естественного происхождения. Предлагается подход, ориентированный на применение средств радиоинтерферометрии в целях прецизионного позиционирования и привязки временной шкалы удаленного радиотелескопа. Данный метод может быть полезен для решения специальных задач координатно-временного и навигационного обеспечения удаленных потребителей с произвольной топологией позиционирования.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, GPS, позиционирование, метод наименьших квадратов, синхронизация.

Введение

В настоящее время основой для позиционирования удаленных потребителей являются данные навигационных определений штатного приемника сигналов ГЛОНАСС. Для улучшения характеристик координатно-временного обеспечения (КВО) потребителей с произвольной топологией дислокации предлагается использовать прием и обработку излучения квазаров на мобильные радиотелескопы, которые в настоящее время стали доступны для применения благодаря появившейся технической возможности существенного уменьшения размеров параболических зеркал антенн, что, впрочем, неизбежно приводит к потере усиления и без того слабых сигналов. В статье рассматривается навигационная задача КВО потребителей в сложившейся ситуации, а также новые подходы к поиску приемлемого решения в пространстве состояний в условиях растущего геометрического фактора.

Алёшкин Андрей Петрович. Доктор технических наук, профессор кафедры передающих, антенно-фидерных устройств и средств СЕВ, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (С.-Петербург).

Зубарев Константин Константинович. Аджюнт кафедры передающих, антенно-фидерных устройств и средств СЕВ, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского.

Иванов Дмитрий Викторович. Кандидат физико-математических наук, директор, Институт прикладной астрономии РАН (С.-Петербург).

Макаров Андрей Александрович. Кандидат технических наук, доцент кафедры передающих, антенно-фидерных устройств и средств СЕВ, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского.

Решение задачи координатно-временного обеспечения потребителей по данным радиоинтерферометрических наблюдений

В настоящее время практически во всех приемных пунктах (ПП) системы единого времени (СЕВ) координаты их текущего положения формируются в модуле навигационной аппаратуры потребителя ГНСС ГЛОНАСС/GPS [4, 5]. Поправка часов ГНСС содержится в навигационном сообщении в виде полиномиальной модели. Задержки сигнала в аппаратуре спутника и в приемнике выявляются путем калибровок. По результатам навигационных измерений решается классическая навигационная задача [6, 7].

В качестве альтернативного способа местоопределения удаленного потребителя предлагается использование малогабаритного радиотелескопа для измерения разности прихода излучения относительно момента его фиксации на опорном радиотелескопе с высокоточной привязкой фазового центра антенны.

Радиотелескопы больших размеров обеспечивают надежный прием излучения слабых источников, но для решения современных координатных задач они не обладают необходимой оперативностью сканирования – их антенны поворачиваются со скоростью около одного градуса в секунду.

В связи с этим в последние годы разрабатываются и эффективно используются малогабаритные антенны, скорость обзора пространства которых в несколько раз выше. Диалектически оправданной платой за это является их способность наблюдать только яркие квазары, но для решения задач КВО, как будет показано, при соответствующем программно-алгоритмическом обеспечении этого достаточно.

Уменьшение диаметра антенны снижает чувствительность радиотелескопа, что должно быть скомпенсировано определенными техническими решениями в приемной аппаратуре и комплексах обработки наблюдений, такими как увеличение полосы пропускания и снижение шумовой температуры фидерных трактов, а также усовершенствованные алгоритмы обработки наблюдений [8].

В настоящее время успешные разработки малогабаритных радиоинтерферометрических систем с длинной базой РСДБ выполнены в Японии: в 2009 году запущен проект компактной РСДБ-системы «MARBLE» диаметром 1,6 м (рис. 1) [8, 10].



Рис. 1. Приемная антенна РСДБ-пункта диаметром 1,6 м системы «MARBLE»

В рамках данного проекта был разработан малогабаритный радиотелескоп (МРТ) с диаметром антенны 1,6 м, проведены эксперименты на базовой линии Касима–Цукуба

(около 54 км) с помощью двух МРТ. В октябре 2010 года были получены усредненные длины базовой линии с погрешностью $\pm 2,5$ мм. В 2015 году этот показатель улучшился до значения $\pm 2,4$ мм [17, 18].

В Российской Федерации исследования по данному направлению также активно проводятся. Так, в Институте прикладной астрономии РАН разрабатываются компактные антенны РТ диаметром 1,5 и 2,4 м (рис. 2) [11]. Поскольку при переходе от больших антенн к малым растет влияние геометрического фактора на местоопределение позиции радиотелескопа, с одной стороны, и влияние входных шумов – с другой, решение задачи КВО не является тривиальным и требует разработки оригинальных методик.

Рассмотрим подход к определению положения фазового центра антенны МРТ в произвольной точке земной поверхности по наблюдениям излучения квазаров в радиоинтерферометрических комплексах с длинной базой путем решения обратной навигационной задачи [1, 2, 3, 12, 13, 14].

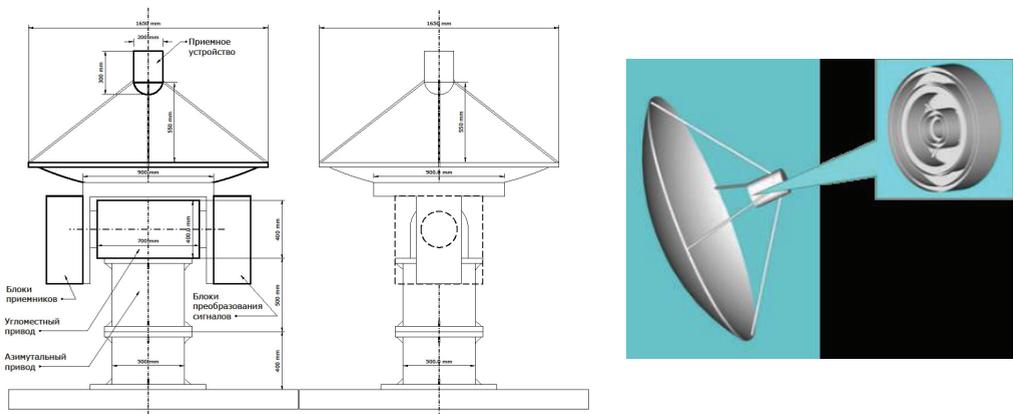


Рис. 2. Технический облик разрабатываемой малогабаритной антенны РТ диаметром 1,5 м

Привлекательность подхода заключается в использовании естественных источников радиоизлучения, что повышает устойчивость процесса навигационных определений. Кроме того, зеркальные антенны МРТ характеризуются высокой направленностью, а к самому моменту выполнения мероприятий КВО не предъявляется особых требований.

Если ориентироваться на использование мобильного варианта радиотелескопа, то серьезный научный и прикладной интерес вызывает вопрос о достижимых точностях его позиционирования в сравнении со стационарным вариантом, для которого отмеченная погрешность составляет миллиметровые значения.

Представим способ уточнения координат малогабаритного варианта МРТ на основе определения разности между временем прихода сигнала от одного и более квазаров на мобильный и стационарный телескопы, координаты последнего известны с потенциально достижимой точностью (рис. 3).

Задача формулируется следующим образом.

Имеются стационарные РТ с крупногабаритными антеннами, координаты фазовых центров которых точно известны. Есть подвижные МРТ с уточняемыми координатами.

Осуществление одновременных измерений по квазарам позволяет рассчитать текущие координаты МРТ, благодаря чему становится возможной реализация процедуры сличения шкалы стандарта частотно-временного обеспечения МРТ со шкалой стандарта опорного РТ.

На рис. 3 позиции 1, 2, 3 – это РТ-станции существующего комплекса «Квазар» [15], а позиции 4, 5 – исследованные в процессе моделирования варианты размещения МРТ.

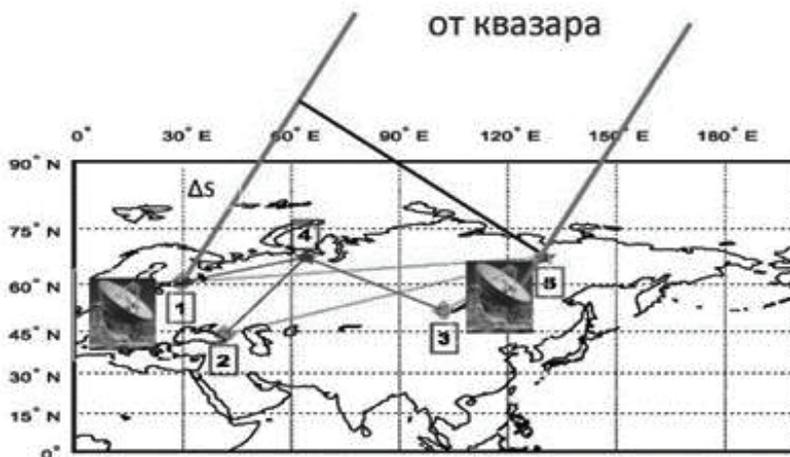


Рис. 3. Пример расположения МРТ

Действительно, если позиция МРТ определена с необходимой погрешностью, то основной вклад в несоответствие измеренного времени запаздывания прихода излучения от квазара на пункт 1 относительно пункта 2 расчетному значению вносит рассогласование ШВ соответствующих стандартов.

Пусть i -е наблюдение источника излучения с координатами на небесной сфере α_i, δ_i выполняется в момент звездного времени t_i , где α_i – угол склонения, а δ_i – угол восхождения источника.

Излучение от квазара достигает антенны радиотелескопа 1 (2, 3) относительно антенны радиотелескопа 4 (5) с задержкой τ , обусловленной разностью хода $\Delta S = c\tau$, где c – скорость распространения радиоволн.

Задержка τ измеряется корреляционным методом. Записи сигналов $S(t)$ и $S(t+\tau)$ на телескопах 4 (5) и 1 (2, 3) сводятся в корреляторе, на выходе которого воспроизводится корреляционная функция, имеющая максимум при значении τ , соответствующем реальной задержке распространения излучения до радиотелескопа 1 (2, 3) относительно МРТ 4 (5).

Представим упрощенную математическую модель навигационной функции измерений.

Задержка τ_i распространения излучения от i -го квазара до радиотелескопов (для простоты) 1 и 2 может быть представлена соотношением

$$\frac{1}{\tilde{n}} \left(\cos \alpha_i ((x_1 - x_2) \cos \delta_i - (y_1 - y_2) \sin \delta_i) + (z_1 - z_2) \sin \alpha_i \right), \quad (1)$$

где ω – угловая скорость вращения Земли; x_1, y_1, z_1 – координаты радиотелескопа 1; x_2, y_2, z_2 – координаты радиотелескопа 2.

Записи сигналов на радиотелескопах привязываются к единой шкале времени.

Основой методики определения координат мобильной станции по РСДБ-наблюдениям является формирование уравнения наблюдения вида

$$\nabla \vec{\tau}_{n \times 1} = A_{n \times 4} \cdot \nabla \vec{q}_{4 \times 1}. \quad (2)$$

Здесь $\nabla \vec{\tau}_{n \times 1}$ – вектор невязок измерений; n – количество измерений, соответствующих моментам наблюдения $t = 1, 2, \dots, i, \dots, n$; $A_{n \times 4}$ – матрица частных производных размерностью $[n \times 4]$; $\nabla \vec{q}_{4 \times 1}$ – поправки к трем координатам положения МРТ и к его шкале времени.

Истинные значения координат МРТ обозначим $\vec{q}_{2ict} = [x_{2ict}, y_{2ict}, z_{2ict}]$. Истинные значения задержки времени прихода сигнала от квазара $\tau_{1ict}, \tau_{2ict}, \dots, \tau_{iict}, \tau_{nict}$ рассчитываются по формуле (1).

Значения шума, искажающего измерения и распределенного по нормальному закону, обозначим $\tau_{1шум}, \tau_{2шум}, \dots, \tau_{iшум}, \tau_{nшум}$.

Учитывая уход шкалы времени МРТ t_{sm} , получаем вектор измеренных значений задержки $\tilde{\tau}_{изм}$ размерности $[n \times 1]$ в виде

$$\tilde{\tau}_{изм} = \tau_{ict} + \tau_{шум} + t_{sm}. \quad (3)$$

Моделируем реальное положение МРТ путем смещения в пространстве состояний его истинной позиции в априори заданных границах модели $\vec{q}_{2cm} = [x_{2cm}, y_{2cm}, z_{2cm}]$.

Рассчитываем вектор опорных значений измерений для этой позиции $\tau_{1cm}, \tau_{2cm}, \dots, \tau_{icm}, \tau_{ncm} = \tilde{\tau}_{n \times 1cm}$ и вектор невязки $\nabla \vec{\tau} = \tilde{\tau}_{изм} - \tilde{\tau}_{n \times 1cm}$.

Формируем частные производные от измеряемых параметров по искомому.

Составляем матрицу наблюдения A размерности $[n \times 4]$:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial \tau_1}{\partial x} & \frac{\partial \tau_1}{\partial y} & \frac{\partial \tau_1}{\partial z} & 1 \\ \frac{\partial \tau_2}{\partial x} & \frac{\partial \tau_2}{\partial y} & \frac{\partial \tau_2}{\partial z} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \tau_i}{\partial x} & \frac{\partial \tau_i}{\partial y} & \frac{\partial \tau_i}{\partial z} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \tau_n}{\partial x} & \frac{\partial \tau_n}{\partial y} & \frac{\partial \tau_n}{\partial z} & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Находим $\nabla \vec{q}$ по известной формуле, реализующей процедуру формирования оценки по методу наименьших квадратов:

$$\nabla \vec{q} = (A^T A)^{-1} A^T \nabla \vec{\tau} [1].$$

Процесс решения носит итерационный характер, так как матрица A на каждом шаге пересчитывается после коррекции текущего вектора положения фазового центра антенны МРТ по формуле $\vec{q}_{2cm} = \vec{q}_{2cm} + \Delta \vec{q}_i$, где i – номер итерации.

Итерационный процесс продолжается, пока не будет выполняться условие $|\Delta\vec{q}_{i+1}| > |\Delta\vec{q}_i|$.

Точность решения навигационной задачи характеризуется корреляционной матрицей погрешностей оценивания $K_q = \sigma^2 (A^T A)^{-1}$, где σ^2 – дисперсия шума измерений.

Моделирование процесса местоопределения МРТ выполнено с использованием процедуры минимизации суммы квадратов невязок $\nabla \vec{\tau} = \vec{\tau}_{изм} - \vec{\tau}_{n \times 1cm}$. В качестве модели поверхности Земли принята модель ПЗ-90.11 [11].

Преимуществами данного метода являются простота и быстрота расчетов. Требуется всего 2-3 итерации для нахождения координат МРТ при наличии приемлемого геометрического фактора.

Проанализируем результаты сравнения методов позиционирования стационарного ПП СЕВ с помощью технологий ГНСС и мобильных РСДБ наблюдений.

Для сравнения были использованы следующие данные:

- 1) результаты позиционирования, выполненного с помощью навигационного приемника сигналов ГНСС ГЛОНАСС К-161 в абсолютном режиме [16];
- 2) результаты имитационного компьютерного моделирования процесса позиционирования МРТ по данным обработки наблюдений излучения квазаров в радиоинтерферометрических комплексах с длинной базой.

В таблице представлены результаты местоопределения ПП СЕВ (координаты при $t_n = 1$ с, $t_n = 360$ с составляют $X = 2764545,69$, $Y = 1614601,91$, $Z = 5497986,72$).

Т а б л и ц а

Результаты местоопределения ПП СЕВ

Наименование источника излучения	Количество (ГЛОНАСС/GPS-спутников, МРТ-квазаров)	Время измерения, с	Измеряемые координаты, м			СКП	ΔR
			Наименование параметра	Текущие	Средние		
ГЛОНАСС	8	120	X	2764538,41	2764538,84	6,85	7,79
			Y	1614604,31	1614604,91	3,00	
			Z	5497985,81	5497988,92	2,20	
		360	X	2764537,44	2764537,98	7,71	8,38
			Y	1614601,06	1614603,55	1,64	
			Z	5497976,03	5497983,87	2,85	
ГЛОНАСС +GPS	7+9	120	X	2764539,13	2764538,84	6,85	11,25
			Y	1614599,00	1614598,31	3,60	
			Z	5497980,47	5497978,56	8,16	
		360	X	2764541,97	2764540,09	5,60	5,59
			Y	1614599,94	1614598,95	2,96	
			Z	5497981,91	5497980,92	5,80	

МРТ	4	120	X	2764539,13	2764543,21	4,08	4,16
			Y	1614599,00	1614600,57	1,57	
			Z	5497980,47	5497981,05	0,58	
		360	X	2764541,97	2764543,13	1,16	1,17
			Y	1614599,94	1614600,00	0,06	
			Z	5497981,91	5497982,06	0,15	

Погрешность местоопределения ΔR определяется по следующей формуле:

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

Результаты моделирования показывают, что при одном и том же интервале измерений результирующая погрешность местоопределения при использовании данных наблюдений излучения квазаров в радиоинтерферометрических комплексах с длинной базой более чем в два раза меньше, чем погрешность позиционирования, выполненного с помощью навигационного приемника сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS, причем при меньшем числе наблюдаемых квазаров.

На рис. 4 представлена итерационная зависимость погрешности местоопределения МРТ по результатам измерений для двух квазаров на интервале наблюдения $t_n = 120$ с и при воздействии шума со среднеквадратичным отклонением (СКО) $\sigma = 10^{-6}$ с. Для этих исходных данных процесс оценивания по методу наименьших квадратов расходится (погрешность местоопределения ΔR составляет более 200 м).

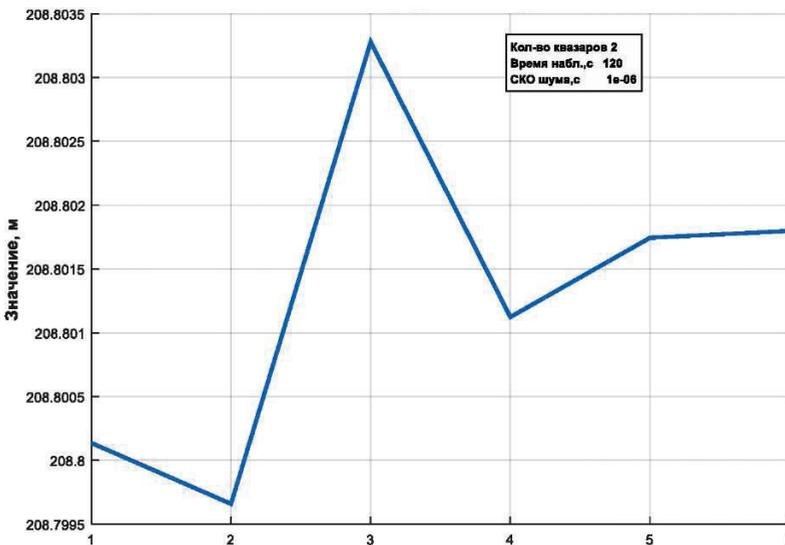


Рис. 4. Итерационный процесс местоопределения МРТ по наблюдениям двух квазаров: $t_n = 120$ с, $\sigma = 10^{-6}$ с.

Построение целевой функции (рис. 5) подтверждает отсутствие глобального экстремума при поиске решения навигационной задачи для выбранных исходных данных.

На рис. 6 представлена зависимость погрешности местоопределения МРТ от номера итерации для четырех квазаров при интервале их наблюдения $t_n = 120$ с и воздействии шума с СКО $\sigma = 10^{-9}$ с.

Для этих исходных данных итерационный процесс формирования оценки по методу наименьших квадратов завершается на пятой итерации, и ее СКП составляет менее 0,3 м.

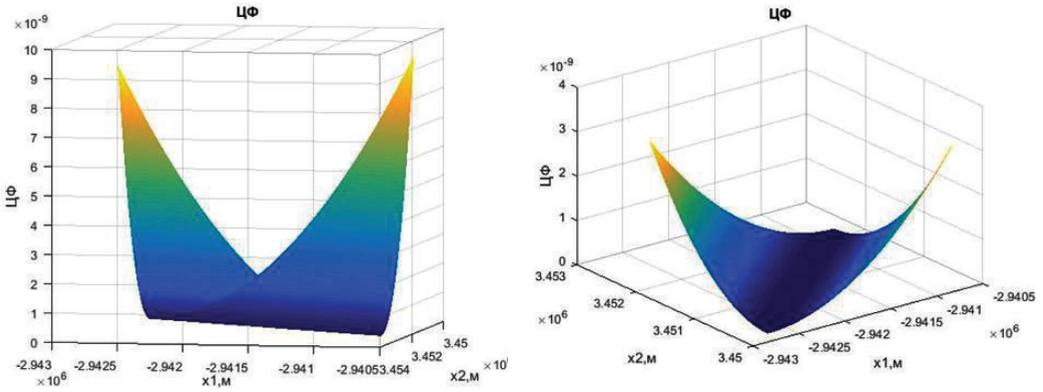


Рис. 5. Целевая функция процесса местоопределения МРТ по наблюдениям двух квазаров: $t_n = 120$ с, $\sigma = 10^{-6}$ с

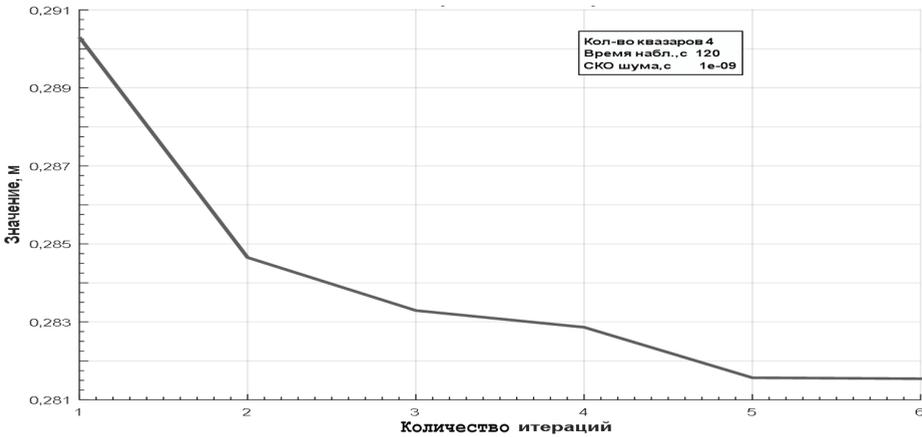


Рис. 6. Итерационный процесс местоопределения МРТ по наблюдениям четырех квазаров: $t_n = 120$ с, $\sigma = 10^{-9}$ с

На рис. 7, 8 представлена зависимость погрешности местоопределения МРТ и целевая функция процесса местоопределения по наблюдениям четырех квазаров при увеличении интервала наблюдения до $t_n = 360$ с и СКО шума $\sigma = 10^{-9}$ с соответственно.

Для этих исходных данных оценка по методу наименьших квадратов формируется на второй итерации и ее погрешность не превышает единиц сантиметров.

Результаты моделирования показывают, что высокие точности местоопределения МРТ обеспечиваются при незначительной продолжительности интервалов наблюдения квазаров и малой интенсивности шума наблюдений. При увеличении дисперсии шумов и изменении геометрического фактора в худшую сторону итерационный процесс поиска решения задачи местоопределения может стать расходящимся.

Для подобных ситуаций была разработана методика определения координат МРТ на основе процедур эмпирического поиска решения.

При этом для нахождения вектора \vec{q} выбран симплексный метод Нелдера–Мида прямого поиска экстремума целевой функции.

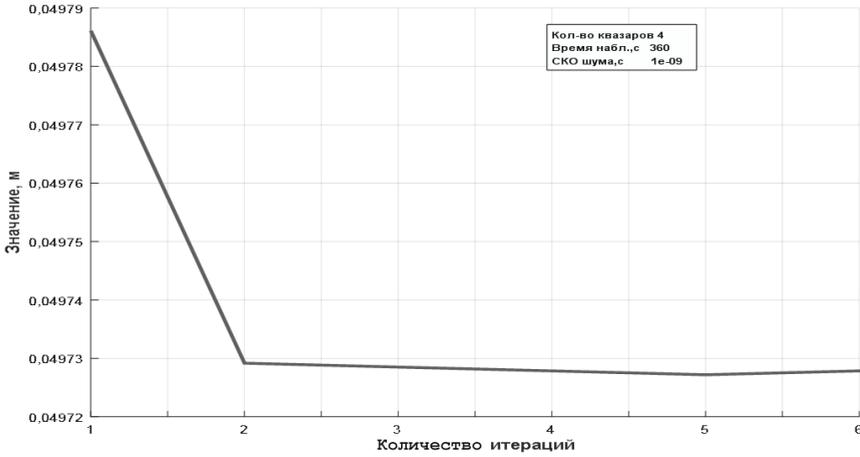


Рис. 7. Итерационный процесс местоопределения МРТ по наблюдениям четырех квазаров: $t_H = 360$ с, $\sigma = 10^{-9}$ с

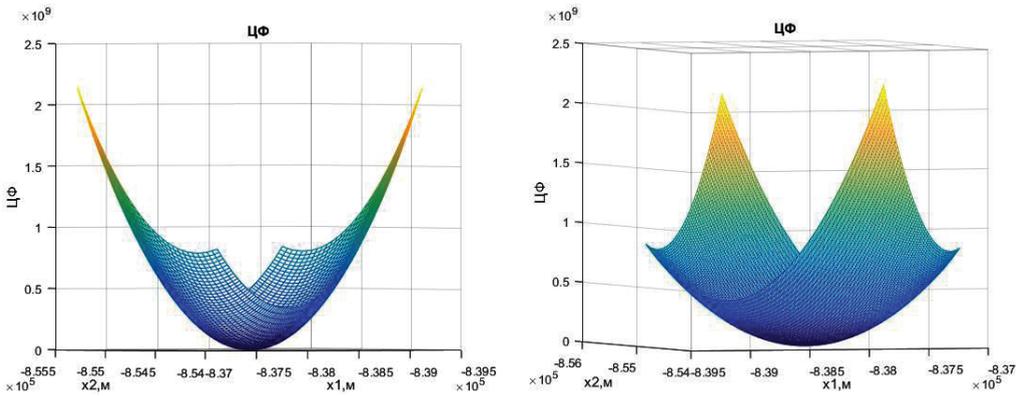


Рис. 8. Целевая функция процесса местоопределения МРТ по наблюдениям четырех квазаров: $t_H = 360$ с, $\sigma = 10^{-9}$ с

На рис. 9 представлена погрешность местоопределения МРТ при приеме излучения двух квазаров при времени наблюдения по $t_H = 120$ с и СКО шума $\sigma = 10^{-9}$ с с использованием процедуры прямого эмпирического поиска решения.

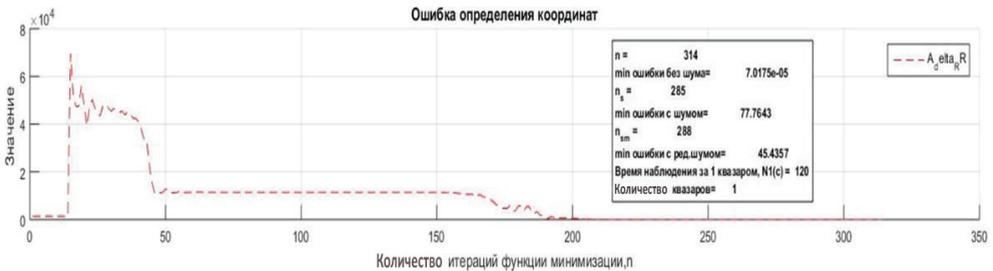


Рис. 9. Эмпирический поиск решения по наблюдениям двух квазаров: $t_H = 120$ с, $\sigma = 10^{-9}$ с

На рис. 10 представлена погрешность местоопределения МРТ при приеме излучения четырех квазаров при увеличении времени наблюдения до $t_n = 1200$ с и СКО шума $\sigma = 10^{-9}$ с с использованием эмпирического поиска решения.

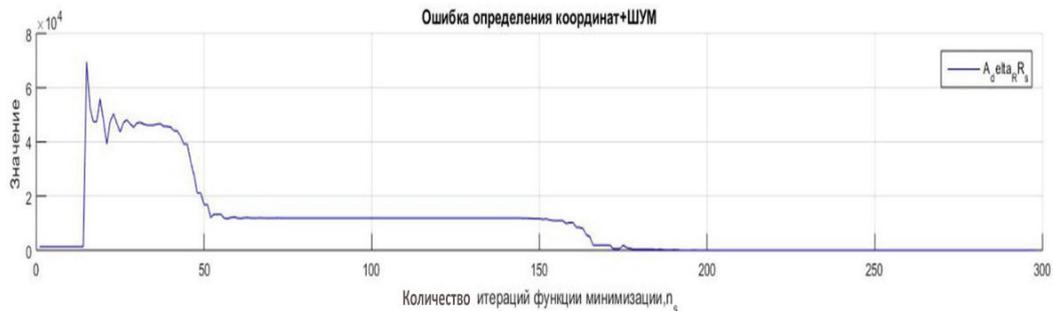


Рис. 10. Эмпирический поиск решения по наблюдениям четырех квазаров: $t_n = 1200$ с, $\sigma = 10^{-9}$ с

Результаты моделирования процесса позиционирования МРТ при использовании симплексного метода показывают, что погрешность местоопределения МРТ становится приемлемой (на уровне единиц метров) уже при приеме излучения двух квазаров, но при времени наблюдения более $t_n = 1200$ с, причем для решения задачи требуется порядка 200 итераций. Важным аргументом в пользу эмпирического поиска решения является то, что его реализация требует сравнительно небольших вычислительных затрат (для современных ПЭВМ процесс местоопределения МРТ до обозначенного уровня погрешности занимает менее трех минут).

В ходе проведенных исследований авторами разработан программно-моделирующий комплекс (ПМК), который реализует алгоритмы КВО мобильного радиотелескопа по РСДБ-наблюдениям классическим методом решения обратной задачи и путем прямого эмпирического поиска решения. ПМК позволяет формировать целевую функцию и получать сравнительную оценку точности решения задачи КВО удаленных потребителей при различном составе исходных данных.

Заключение

Проведен сравнительный анализ способов КВО удаленных потребителей по данным измерений штатного навигационного приемника сигналов ГНСС ГЛОНАСС и по смоделированным наблюдениям излучения квазаров с помощью малогабаритных телескопов в радиоинтерферометрических комплексах с длинной базой.

Результаты моделирования показывают, что предложенный способ КВО с помощью мобильной радиоинтерферометрии позволяет получить более точное решение при приеме с использованием МРТ излучений квазаров даже на непродолжительных временных интервалах, но при малой интенсивности шума измерений. При увеличении СКО шума наблюдений итерационный процесс поиска решения может расходиться. В этом случае целесообразен переход к прямому эмпирическому поиску решения.

Преимущества способа КВО потребителей с использованием наблюдений мобильных РСДБ состоят в более высокой устойчивости процессов позиционирования потребителей в сравнении с ГНСС-обеспечением.

В процессе имитационного математического моделирования показано, что для среднестатистических условий РСДБ-наблюдений погрешность позиционирования МРТ составляет единицы дециметров, а неточность сличения ШВ для удаленного потребителя достигает единиц наносекунд.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Шебшаевич В.С., Дмитриев П.П., Иванцевич Н.В.** Сетевые спутниковые радионавигационные системы / Под ред. В.С. Шебшаевича. М.: Радио и связь, 1993. 408 с.
2. **Дулевич В.Е.** Теоретические основы радиолокации: учебное пособие для вузов / Под ред. В.Е. Дулевича, 2-е изд. М.: Сов. Радио, 1978. 608 с.
3. **Клюев Н.Ф., Костылев А.А., Мельников Б.Г., Степанов М.Г., Ткачев Е.А.** Основы радионавигационных измерений. МО СССР. 1987. 430 с.
4. **Модули первого поколения ГНСС ГЛОНАСС/ GPS — 1К-161, К-161** [Электронный ресурс]. URL: <http://rirt.ru/ru/products> (дата обращения: 17.01.2018).
5. **Навигационный приемник 1К-161-42** спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS [Электронный ресурс]. URL: <http://www.glonass-portal.ru/catalog/modules/1k161> (дата обращения: 17.01.2018).
6. **Антонович К.М.** Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. М.: ФГУП «Картоцентр», 2005. Т. 1. 334 с.
7. **Антонович К.М.** Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. М.: ФГУП «Картоцентр», 2005. Т. 2. 360 с.
8. **Иванов Д.В., Мардышкин В.В., Лавров А.С. Евстигеев А.А.** Трехдиапазонная приемная система для радиотелескопов с малыми антеннами // Труды ИПА РАН. 2013. Вып. 27. С. 197–201.
9. **Иванов Д.В., Ипатов А.В., Гаязов И.С. и др.** Оценка возможности использования малогабаритных РСДБ систем для решения задач КВНО // КВНО-2017. Санкт-Петербург, 2017.
10. **Суркис И.Ф., Зимовский В.Ф., Кен В.О., Курдубова Я.Л., Мишин В.Ю., Мишина Н.А., Шантырь В.А.** Программный коррелятор для обработки наблюдений РСДБ-сети малых антенн. Результаты первых испытаний // Труды Института прикладной астрономии РАН. 2016. Вып.37. С. 19–22.
11. **Дугин Н.А, Гавриленко В.Г., Антипенко А.А. и др.** Радиоинтерферометр с независимым приемом ННГУ – НИРФИ – Ирбене. Первые результаты // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2013. № 1 (1). С. 79–85.
12. **Айвазян С.А.** Прикладная статистика. Основы эконометрики. Том 2. М.: Юнити-Дана, 2001. 432 с.
13. **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.
14. **Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.11).** Справочный документ. М.: ВТУ ГШ ВС РФ, 2014. 52 с.
15. **А.А. 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.
16. **National Institute of Information and Communications Technology.** [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nict.go.jp/en/indexhtml> (дата обращения: 01.05.2017).
17. **Development of the Compact VLBI System for Calibrating GNSS and EDM Devices, Journal of the National Institute of Information and Communications Technology,** 2010, vol. 57, no. 3-4.
18. **Current Status of the Development of a Transportable and Compact VLBI System by NICT and GSI, IVS 2010 General Meeting Proceedings,** p. 55–59. URL: <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/publications/gm2010/ishii.pdf> (дата обращения: 01.05.2017).

Aleshkin, A.P., Zybarev, K.K., Makarov, A.A. (Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia), **Ivanov, D.V.** (Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia) A Method for Positioning and Timing Support of Remote Users Based on Mobile Radio Interferometry, *Girokopiya i Navigatsiya*, 2020, vol. 28, no. 1 (108), pp. 54–65.

Abstract. The results of a comparative analysis of methods for positioning and timing support of remote users based on GNSS measurements from a GLONASS receiver and observational data on quasar radiation from compact very long base radio interferometric (VLBI) systems are discussed. Using radio telescope measurements increases the stability of positioning-and-timing and navigation support of users owing to observations of radio-frequency radiation emitted by the sources of natural origin. The approach proposed in this paper focuses on using radio interferometry for precision positioning and timing of remote radio telescopes. This method can be helpful for specific applications relevant to positioning and timing support for remote users with an arbitrary positioning topology.

Key words: GLONASS, GPS, positioning, least-squares method, compact radio telescope, VLBI system.

Материал поступил 17.07.2019