

Применение мобильных длиннобазовых радиотелескопов для повышения устойчивости координатно-временного и навигационного обеспечения потребителей

Application of mobile longspan radio telescopes for an increase in stability of coordinate and time and navigation providing consumers

Алёшкин / Aleshkin A.

Андрей Петрович

(a_aleshkin@mail.ru)

доктор технических наук, профессор.

ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия

имени А. Ф. Можайского»

(ВКА им. А. Ф. Можайского) МО РФ,

профессор кафедры.

г. Санкт-Петербург

Макаров / Makarov A.

Андрей Александрович

(almakand@mail.ru)

кандидат технических наук, доцент.

ВКА им. А. Ф. Можайского,

докторант кафедры.

г. Санкт-Петербург

Иванов / Ivanov D.

Дмитрий Викторович

(dvi@iaaras.ru)

кандидат физико-математических наук.

ФГБУН Институт прикладной астрономии РАН,

генеральный директор.

г. Санкт-Петербург

Алёшкин / Aleshkin N.

Никита Андреевич

(nikita.aleshkin@scaegroup.com)

кандидат технических наук.

АО «Научный центр прикладной электродинамики»,

координатор научно-производственного процесса.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: РСДБ – VLBI; КВНО – СТНП; системы координат – coordinate systems; шкала времени – time scale; синхронизация – sync.

В статье рассмотрена методика, используемая при моделировании процесса определения координат мобильной станции по наблюдениям радиоинтерферометрических комплексов с длинной базой (РСДБ) путем решения обратной задачи по методу наименьших квадратов. Применение мобильных длиннобазовых радиотелескопов позволяет повысить устойчивость координатно-временного и навигационного обеспечения потребителей.

The article is technique used in modeling the procedure for determining the coordinates of a mobile station based on observations of radiointerferometric complexes with a long base (VLBI) by solving the inverse problem using the least-squares procedure is considered. The use of mobile long-base radio telescopes makes it possible to increase the stability of the coordinate-time and navigation support of consumers.

Возрастающие требования к качеству координатно-временных определений потребителя, выполняемых на основе спутниковых навигационных технологий, приводит к необходимости совершенствования координатно-временного и навигационного обеспечения (КВНО). Одно из направлений модернизации отечественной системы

ГЛОНАСС связано с переходом комплекса КВНО на беззапросные технологии траекторных измерений. Эти технологии обладают большей производительностью и информативностью по сравнению с запросными, однако их применение затруднено уходом шкал времени (ШВ) часов пунктов наземного комплекса управления ГЛОНАСС относительно ШВ центрального синхронизатора (ЦС).

Для выполнения фундаментальных научных исследований и решения прикладных хозяйственных и оборонных задач большое значение имеет оперативная информация о Всемирном времени и параметрах вращения земли (ПВЗ). Только РСДБ позволяет измерить ПВЗ, Всемирное время и непосредственно установить связь земной и небесной систем координат. Потому РСДБ-технологии стали основой КВНО системы ГЛОНАСС. Точность определения координат РСДБ станций прогнозируется в ближайшем будущем не хуже 2 мм [1]. Кроме того, космические источники излучения формируют сигналы естественного происхождения и, следовательно, обладают повышенной помехоустойчивостью. Обычно радиоинтерферометр состоит из двух радиотелескопов, разнесенных на сотни или тысячи километров и наблюдающих один и тот же квазар. Так как квазары находятся от Земли на расстоянии в десятки и сотни миллионов световых лет, приходящие от них радиоволны имеют идеально плоский фронт, а поступающие на оба радиотелескопа сигналы приходят по строго параллельным путям. Эти шумовые сигналы совершенно идентичны,

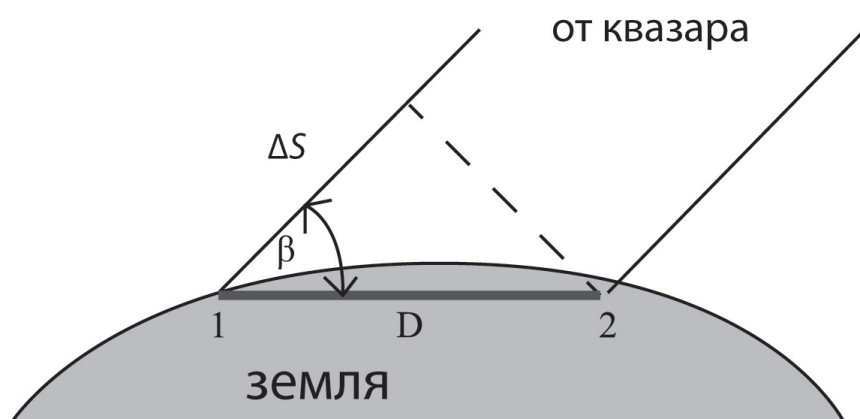


Рис. 1. Радиоинтерферометр, состоящий из двух радиотелескопов

но приходят на радиотелескопы с некоторой временной задержкой один относительно другого, обусловленной разностью расстояний от радиотелескопов до квазара.

Представим алгоритм уточнения координат мобильного варианта РСДБ (МРСДБ) на основе определения разности времен прихода сигнала от одного и более квазаров до мобильного и стационарного телескопа, координаты которого известны с достаточной точностью. Проводя одновременные измерения по квазарам, определяем текущие координаты МРСДБ. Зная значения этих координат, базу, можно реализовать процедуру сличения ШВ с высокой степенью точности. Каждое i -е наблюдение источника с координатами (α_i, δ_i) выполняется в момент звездного времени t_i , где α_i – угол склонения источника, δ_i – угол восхождения источника.

Излучение от квазара приходит на радиотелескопы 1 и 2 с задержкой τ , обусловленной разностью хода ΔS (рис. 1). Вектор базы D имеет длину $D = \Delta S / \cos \beta$, а так как $\Delta S = V\tau$, где V – скорость радиоволн, то $\tau = (D/V) \cos \beta$.

Эта задержка измеряется корреляционным методом. Записи сигналов $S(t)$ и $S(t+\tau)$ на телескопах 1 и 2 сводятся в корреляторе, на выходе которого воспроизводится корреляционная функция $(\tau) = \langle S(t) \cdot S(t+\tau) \rangle$, имеющая максимум при $\tau=0$. Сдвигая записи до появления максимума выходного сигнала коррелятора, определяют задержку τ , равную величине сдвига.

Задержка τ_i может быть представлена соотношением:

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

где c – скорость света; 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 привязаны к единой шкале времени, для чего их часы необходимо синхронизировать как можно точнее. Для этого местные стандарты частоты и времени контролируются по высокостабильному атомному эталону. Метки времени запи-

сываются вместе с записью разности сигналов на обеих станциях РСДБ, и именно по сдвигу временных меток определяют задержку при корреляционной обработке записей.

Основой методики определения координат мобильной станции по РСДБ наблюдениям посредством решения обратной задачи является формирование уравнения наблюдения вида [4, 5, 6] $\nabla \tilde{\tau}_{n \times 1} = A_{n \times 3} * \nabla \tilde{q}_{3 \times 1}$.

Для этого:

1. Определяем количество точек измерений, соответствующих времени наблюдения $t = 1, 2, \dots, i, \dots, n$.
2. Выбираем истинные значения координат второго мобильного радиотелескопа (МРСДБ) $\tilde{q}_{2 \text{ ист}} = [x_{2 \text{ ист}}, y_{2 \text{ ист}}, z_{2 \text{ ист}}]$.
3. С учетом п. 1 рассчитываем истинные значения задержки прихода сигнала от квазара по формуле (1) $\tau_{1 \text{ ист}}, \tau_{2 \text{ ист}}, \dots, \tau_{i \text{ ист}}, \tau_{n \text{ ист}}$.
4. Формируем шум размерности $[n \times 1]$ по нормальному закону распределения с параметрами $\tau_{1 \text{ шум}}, \tau_{2 \text{ шум}}, \dots, \tau_{i \text{ шум}}, \tau_{n \text{ шум}}$ и возмущаем им истинные значения задержки прихода сигнала от квазара, полученные в п. 3, по формуле

$$\tilde{\tau}_{i \text{ ист}} = \tau_{i \text{ ист}} + \tau_{i \text{ шум}},$$

получаем вектор размерности $[n \times 1]$ зашумленных истинных значений задержки

$$\tilde{\tau}_{1 \text{ ист}}, \tilde{\tau}_{2 \text{ ист}}, \dots, \tilde{\tau}_{i \text{ ист}}, \tilde{\tau}_{n \text{ ист}} = \tilde{\tau}_{n \times 1}.$$

5. Моделируем реальное положение МРСДБ путем смещения истинной позиции в границах модели $\tilde{q}_{2 \text{ см}} = [x_{2 \text{ см}}, y_{2 \text{ см}}, z_{2 \text{ см}}]$.

6. Рассчитываем вектор опорных значений

$$\tau_{1 \text{ см}}, \tau_{2 \text{ см}}, \dots, \tau_{i \text{ см}}, \tau_{n \text{ см}} = \tilde{\tau}_{n \times 1 \text{ см}}$$

и невязку

$$\nabla \tilde{\tau}_{n \times 1} = \tilde{\tau}_{n \times 1} - \tilde{\tau}_{n \times 1 \text{ см}}.$$

7. Линеаризуем зависимость $\tau = f(x, y, z)$. Для этого построим частные производные от измеряемых параметров по искомым.



Рис. 2. Сходимость итерационного процесса местоопределения МРСДБ для квазара '0906+015', $t_{\text{и}}=120\text{с}$, $\sigma=10^{-15}$

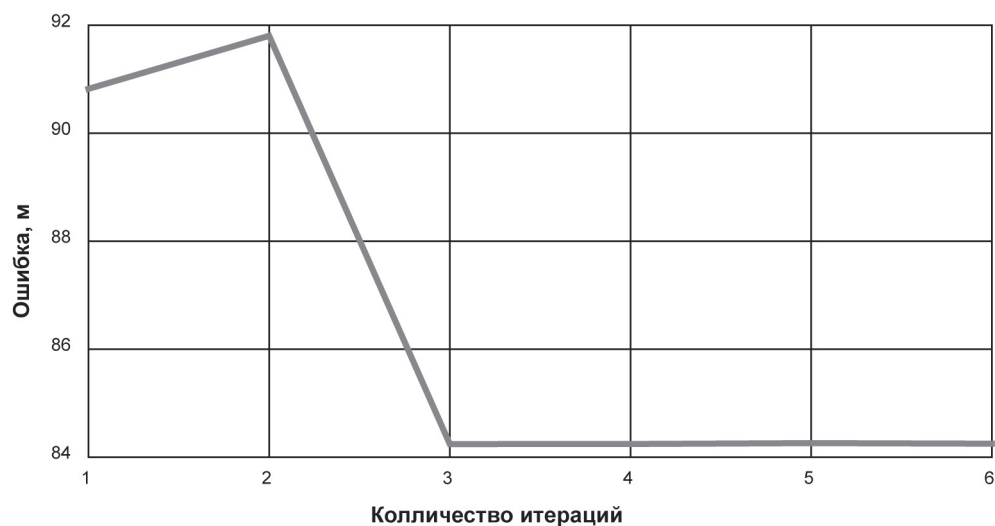


Рис. 3. Сходимость итерационного процесса местоопределения МРСДБ для квазара '0906+015', $t_{\text{и}}=120\text{с}$, $\sigma=10^{-12}$

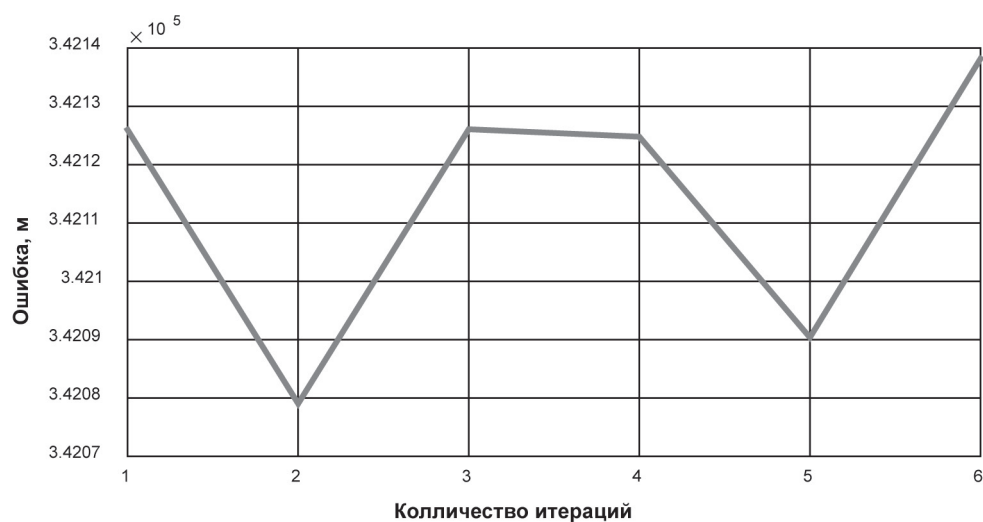


Рис. 4. Сходимость итерационного процесса местоопределения МРСДБ для квазара '1055+018', $t_n=120$ с, $\sigma=10^{-9}$

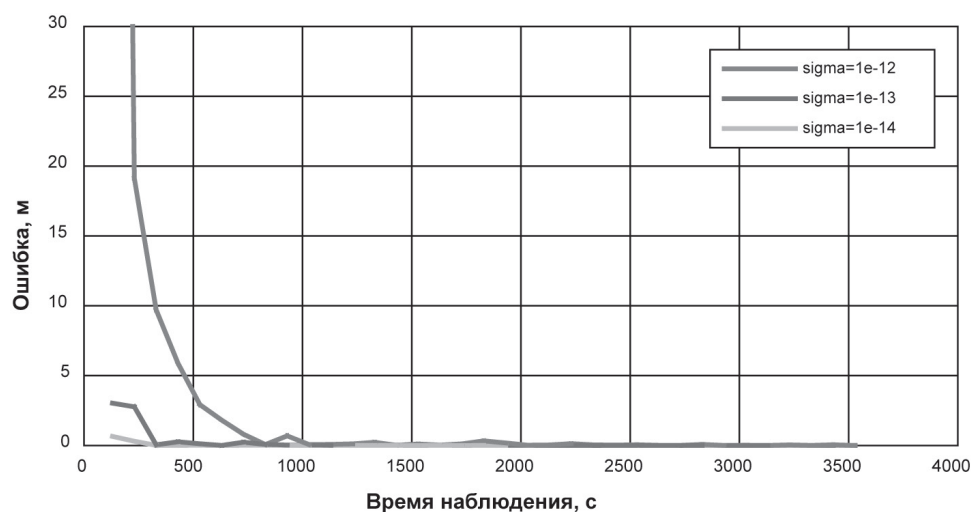


Рис. 5. Ошибка определения координат от времени наблюдения при разных значениях СКО шума

8. Возмущаем параметр x , добавляя δx . Получаем $x + \delta x$.

9. Далее рассчитываем значение $\tau(x + \delta x)$.

10. Для n измерений получим:

$$\tau_1(x + \delta x), \tau_2(x + \delta x), \dots, \tau_i(x + \delta x), \dots, \tau_n(x + \delta x).$$

11. Также рассчитываются невозмущенные значения задержки:

12. Находим частные производные:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tau_1}{\partial x} &= \frac{\Delta \tau_1(\delta x)}{\delta x} \\ \Delta \tau_1(\delta x) &= \tau_1(x + \delta x) - \tau_1(x) \\ \frac{\partial \tau_2}{\partial x} &= \frac{\Delta \tau_2(\delta x)}{\delta x} \\ \Delta \tau_2(\delta x) &= \tau_2(x + \delta x) - \tau_2(x) \\ &\vdots \\ \Delta \tau_i(\delta x) &= \tau_i(x + \delta x) - \tau_i(x) \\ &\vdots \\ \Delta \tau_n(\delta x) &= \tau_n(x + \delta x) - \tau_n(x) \\ \frac{\partial \tau_n}{\partial x} &= \frac{\Delta \tau_n(\delta x)}{\delta x} \end{aligned}$$

13. Составляем матрицу наблюдения A размерности $[n \times 3]$.

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

15. Находим $\nabla \bar{q}$ по формуле $\nabla \bar{q} = (A^T A)^{-1} A^T \nabla \bar{\tau}$. Этот процесс итерационный, т.к. в п. 7 зависимость $\tau = f(x, y, z)$ была линеаризована. Поэтому коррекцию проводим по формуле $\bar{q}_{2cm} = \bar{q}_{1cm} + \Delta \bar{q}_i$, где i – номер итерации.

16. Для нового $\bar{q}_{2cm}$ пересчитываем $\bar{\tau}_{n \times 1cm}$ и матрицу частных производных A . И так, пока не будет выполняться условие $|\Delta \bar{q}_{i+1}| > |\Delta \bar{q}_i|$.

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

Проведено моделирование процесса местоопределения МРСДБ с использованием процедуры наименьших квадратов. Преимуществами данного метода являются простота и быстрота расчетов. Требуется всего 2–3 итерации для нахождения координат при наличии приемлемого геометрического фактора. На рис. 2 представлена зависимость ошибки местоопределения МРСДБ для квазара '0906+015' при времени наблюдения $t_n = 120$ с и воздействии шума с среднеквадратичным отклонением

(СКО) $\sigma = 10^{-15}$. Для этих исходных данных оценка по методу наименьших квадратов формируется уже на второй итерации.

На рис. 3 представлена зависимость ошибки местоопределения МРСДБ для СКО шума $\sigma = 10^{-12}$. Для этих исходных данных оценка по методу наименьших квадратов формируется на третьей итерации, но с худшими параметрами.

Результаты моделирования показывают, что этот метод позволяет получить приемлемое по точности решение даже при наблюдении одного квазара на непродолжительных временных интервалах, но при малой интенсивности шума измерений. При увеличении СКО шума итерационный процесс поиска решения может расходиться. Так, для квазара 1055+018, $t_n = 120$ с и $\sigma = 10^{-9}$ решение задачи оказывается не удовлетворительным (рис. 4).

Таким образом, можно построить зависимость ошибки определения координат от времени наблюдения при разных значениях СКО шума. Результат представлен на рис. 5.

Заключение

Разработана методика определения координат мобильной станции по РСДБ наблюдениям методом решения обратной задачи. Преимущества данной методики – простота и быстрота расчетов для ситуаций с хорошей наблюдаемостью. Результаты моделирования показывают: метод эффективен для значительных времен наблюдения и при малом шуме. При увеличении шума итерационный процесс решения задачи может расходиться. Решение проблемы возможно по пути прямого определения координат мобильной станции с помощью РСДБ-наблюдений на основе аппарата эмпирического поиска решения, что является направлением дальнейших исследований.

Литература

1. Применение подвижных радиоинтерферометров с длинной базой для повышения устойчивости навигационно-временных определений / А.П. Алешкин [и др.] // Изв. вузов. Приборостроение. – 2017. – Т. 60, № 6. – С. 529–537.
2. Veron-Cetty, M. P. Catalogue of Quasars and Active Nuclei: 13-th Edition / M.P. Veron-Cetty, P.A. Veron // Astronomy & Astrophysics manuscript. – March 30, 2010.
3. Параметры земли 1990 года (ПЗ-90.11). Справочный документ – М.: ВТУ ГШ ВС РФ, 2014. – 52 с.
4. Теоретические основы радиолокации: учебное пособие для вузов / А.А. Коростылев [и др.]; под ред. В.Е. Дулевича – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Сов. Радио, 1978. – 608 с.
5. Основы радионавигационных измерений / В.А. Губин [и др.]. – МО СССР, 1987. – 430 с.
6. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В.С. Шебшаевич [и др.]; под ред. В.С. Шебшаевича. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1993. – 408 с.