

Учет структурной задержки при обработке РСДБ-наблюдений

© В. С. Губанов, С. Л. Курдубов, С. М. Миронова, И. Ф. Суркис

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

В настоящее время основные астрометрические каталоги координат внегалактических радиоисточников, получаемые для построения международной небесной системы координат ICRF, строятся без учета структурной задержки источников. Последние попытки применить данные о структурной задержке приводят к каталогам, которые сложно сопоставлять с каталогами других центров, полученными без использования этих данных. Однако с выходом оптического каталога, полученного по наблюдениям спутника GAIA, стало возможно провести его сравнение с новым каталогом, учитывающим структурные задержки. Для построения нового каталога использованы двухкомпонентная и многокомпонентная модели, реализованные в программном комплексе QUASAR. Показано, что применение многокомпонентной модели структурной задержки уменьшает систематические и случайные отклонения построенного каталога от каталога GAIA.

Ключевые слова: координаты радиоисточников, структурная задержка, небесная система координат.

Введение

ИПА РАН участвует в проведении радиоинтерферометрических наблюдений со сверхдлинными базами (РСДБ) по зарубежным и национальным программам для решения задач астрометрии, геодезии и астрофизики [1]. В центре анализа ИПА РАН производится обработка наблюдений с получением каталогов координат наземных станций и внегалактических радиоисточников, рядов параметров вращения Земли (ПВЗ) и тропосферных параметров. Несмотря на то, что формулы учета структурной задержки были выведены еще в 90-ые годы (например, смотри [2]), все предыдущие глобальные решения ИПА РАН и других центров анализа, представленные на серверах Международной РСДБ службы (IVS) были получены без учета структурной части задержки. В данной работе была проанализирована модель, реализованная в программном комплексе QUASAR [8] (Quantitative Analysis and Series Adjustment in

Radio astrometry), произведено сравнение структурных задержек, получаемых по многокомпонентной и двухкомпонентной моделям с задержкой, получаемой из полной карты радиояркости.

Моделирование структурной задержки

Согласно [2] комплексная функция видности может быть записана в следующем виде:

$$V(\vec{b}, \omega, t) = \iint I(P, \omega, t) \exp \left\{ -i \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{b} \cdot \vec{k}) \right\} dx dy, \quad (1)$$

где b — вектор базы, I — интенсивность распределения яркости источника в точке P с частотой ω в момент времени t , k — единичный вектор в направлении P из центра Земли.

$$V(\vec{b}, \omega, t) = \exp \left\{ -i \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{b} \cdot \vec{k}_0) \right\} \iint I(P, \omega, t) \exp \left\{ -i \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{b} \cdot \vec{s}) \right\} dx dy, \quad (2)$$

Здесь введён вектор $\vec{s} = \vec{k} - \vec{k}_0$ в плоскости изображения источника, где ось x направлена в сторону возрастания прямого восхождения, ось y — склонения. Пусть $\varphi = \arg(V)$ — фаза комплексной функции видности, разделим её на геометрическую φ_g и структурную φ_s компоненты: $\varphi = \varphi_g + \varphi_s$, тогда:

$$\varphi_g = -2\pi(\vec{b} \cdot \vec{k}_0)/\lambda, \quad \varphi_s = \arctan(-Z_s/Z_c), \quad (3)$$

где

$$Z_s = \iint I(P, \omega, t) \sin(2\pi R) dx dy, \quad (4)$$

$$Z_c = \iint I(P, \omega, t) \cos(2\pi R) dx dy, \quad (5)$$

и введена безразмерная функция $R = (\vec{b} \cdot \vec{s})/\lambda$. Таким образом, может быть получено выражение для групповой задержки

$$\tau = \partial\varphi / \partial\omega = \partial\varphi_g / \partial\omega + \partial\varphi_s / \partial\omega = \tau_g + \tau_s, \quad (6)$$

где $\tau_g = -\frac{1}{c}(\vec{b} \cdot \vec{k}_0)$ — геометрическая часть и

$$\tau_s(\omega) = \left(Z_s \frac{\partial Z_c}{\partial\omega} - Z_c \frac{\partial Z_s}{\partial\omega} \right) / (Z_c^2 + Z_s^2) \quad (7)$$

— структурная часть задержки.

В программном комплексе QUASAR осуществлены два подхода к моделированию структурной задержки:

- распределение радиояркости рассматривается как сумма δ -функций. На данный момент количество функций ограничено несколькими сотнями. Изображения предоставлены доктором Аланом Фэем [3];
- яркость источника представлена двумя главными компонентами.

Многокомпонентная модель

Распределение яркости задается суммой δ -функций

$$I(P_k) = F_k \delta(x - x_k, y - y_k), \quad (8)$$

где F_k — интенсивность компоненты P_k ; x_k, y_k — координаты P_k ; $x = 0, y = 0$ — координаты центра радиояркости. Тогда могут быть вычислены отдельные составляющие структурной задержки:

$$Z_s = \sum_k F_k \sin(2\pi R_k)$$

$$Z_c = \sum_k F_k \cos(2\pi R_k)$$

$$\partial Z_s / \partial \omega = \frac{\lambda}{c} \sum_k F_k R_k \cos(2\pi R_k)$$

$$\partial Z_c / \partial \omega = -\frac{\lambda}{c} \sum_k F_k R_k \sin(2\pi R_k),$$

которые подставляются в формулу (7) и таким образом получается величина структурной задержки в многокомпонентной модели.

Двухкомпонентная модель

В двухкомпонентной модели рассматриваются два самых ярких пика многокомпонентной модели на плоскости $F_0(0,0), F_n(x_n, y_n)$. После введения параметра $h = F_n/F_0$ и алгебраических преобразований может быть получена формула:

$$\tau_s = \frac{2\pi h(1-h)}{\omega(1+h)} \frac{[1 - \cos(2\pi R)]R}{[h^2 + 2h\cos(2\pi R) + 1]}, \quad (9)$$

где $R = (\vec{b} \cdot \vec{s})/\lambda, \vec{s} = (x_n, y_n)$.

Карта и модель структурной задержки

Для оценки того, насколько хорошо модели представляют структурную задержку, был взят радиоисточник 0056-001 и по FITS (Flexible Image Transport System — распространенный формат сохранения изображений) файлу с его картой посчитана задержка, каждый пиксел карты использовался как дельта-функция. Карта радиоисточника 0056-001 была взята из [4] с сайта <http://astrogeo.org/>. На рис. 1 показана карта радиояркости (слева) и расположение точек в многокомпонентной модели программного комплекса QUASAR. На рис. 2, 3 показаны графики структурной задержки рассматриваемого источника для базы «Зеленчукская»–«Бадары» РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» как функции часового угла. Для построения модели структурной задержки по карте источника использовался каждый пиксел карты

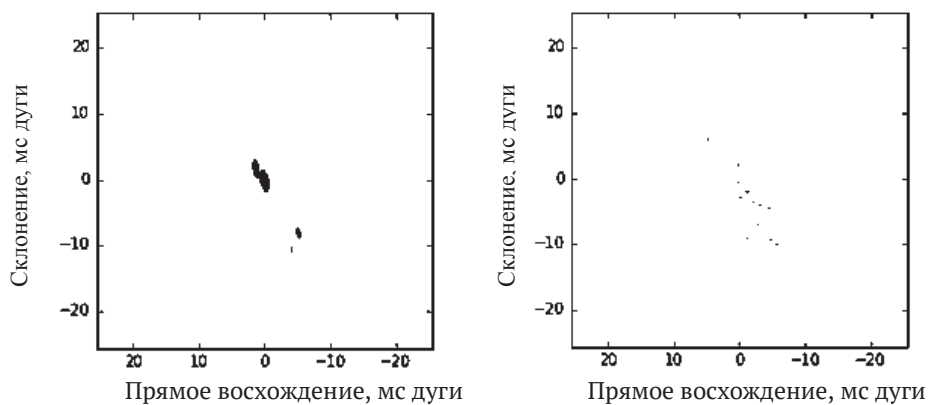


Рис. 1. Распределение радиояркости источника 0056-001 (Слева — карта радиояркости из базы данных http://astrogeo.org/vlbi_images/, справа — набор точек модели в пакете QUASAR); по осям отложено прямое восхождение и склонение относительно координат источника в каталоге

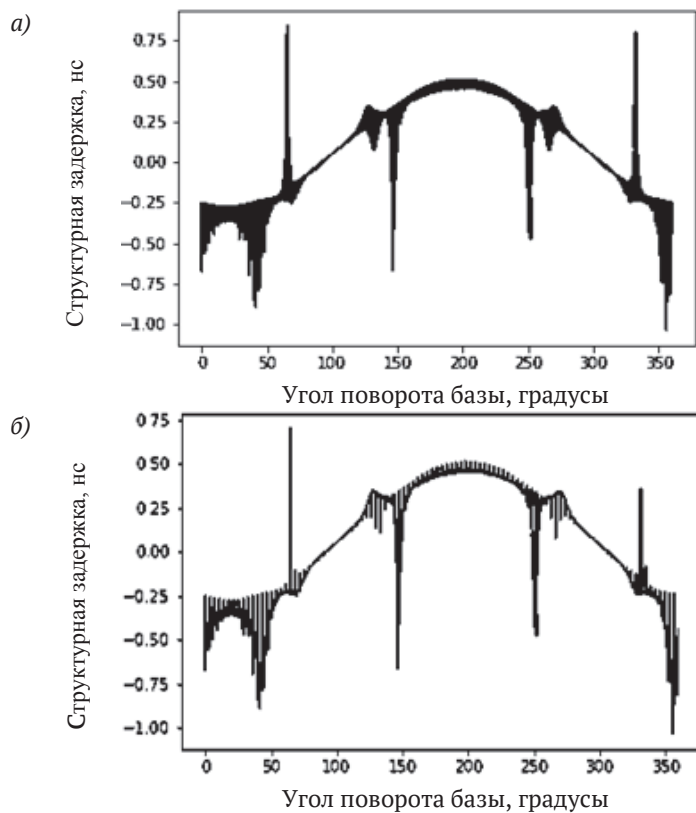


Рис. 2. Зависимость структурной задержки 0056-001 на базе «Зеленчукская»–«Бадары» от угла поворота вектора базы по многокомпонентной модели (а) — полученная по карте радиояркости, б) — по модели программного комплекса QUASAR)

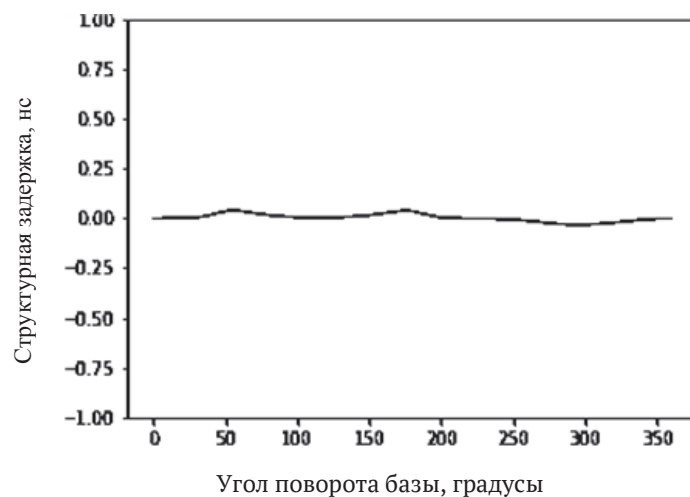


Рис. 3. Зависимость структурной задержки 0056-001 на базе «Зеленчукская»–«Бадары» от угла поворота вектора базы (двухкомпонентная модель)

как точка с заданной для этого пиксела яркостью. Структурная задержка по модели пакета QUASAR строилась по приведенному набору точек. Из рис. 2 видно, что общий характер изменения структурной задержки повторяется при вычислении по двум вариантам многокомпонентной модели, однако при некоторых диапазонах поворота базы наблюдаются эффекты численной неустойчивости.

Параметры глобального РСДБ-решения

Для исследования влияния учета структурной задержки на построение небесной системы координат было построено три глобальных решения с использованием большого объема РСДБ-наблюдений. Базовое решение составлено на основе доступных РСДБ-данных, наблюдавшихся по международным программам IVS с 1980 по 2016 год [5], всего было обработано 9428654 задержек. По тому же набору сессий вычислены решения с применением двухкомпонентной и многокомпонентной моделей структурной задержки.

В решениях координаты источников, положения и скорости станций оценивались как глобальные параметры. Параметры вращения Земли, линейных трендов влажной составляющей тропосферной задержки в зените, тропосферные градиенты и квадратичные тренды часов станций оценивались для каждой сессии отдельно. Также для тропосферной задержки и хода часов методом среднеквадратической коллокации определялись стохастические сигналы в виде поправок к суточным трендам.

Небесная система координат фиксировалась условиями отсутствия вращения на положения 212 источников. При построении земной системы координат вводились ограничения на суммарный сдвиг и вращение 15 станций.

Всего было оценено 6732 глобальных параметра: 3258 положений источников, координаты и скорости 117-ти РСДБ-станций, для 23-х из них со скачками вследствие землетрясений или ремонтов.

Сравнительный анализ полученных решений

Производилось сравнение трех каталогов, найденных из уравнивания, с оптическим каталогом квазаров GAIA (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics) [6] и текущей реализацией небесной системы координат в виде каталога ICRF2 [7]. Были вычислены попарно разности всех 5 рассматриваемых каталогов, средние разности координат и среднеквадратические отклонения приведены в табл. 1–4.

Систематические разности и среднеквадратические отклонения (СКО) в прямом восхождении и склонении по сравнению с каталогом ICRF2 минимальны для базового решения «баз.», что и ожидалось в силу практической идентичности моделей, применяемых в этих случаях при обработке наблюдений.

Систематические разности и СКО в прямом восхождении и склонении решения с многокомпонентной моделью структурной задержки «мульти.» по сравнению с оптическим каталогом квазаров GAIA несколько лучше базового решения, что может свидетельствовать о том, что многокомпонентная модель в целом реально отражает структурную задержку источника и в будущем может обеспечить связь между реализациями небесной системы отсчета в разных частотных диапазонах.

Решение с использованием двухкомпонентной модели «дв.» заметно хуже остальных, как по сравнению с каталогом ICRF2, так и с каталогом GAIA.

Систематические разности в склонении между каталогами ICRF2 и GAIA обусловлены несовпадением радио- и оптических центров яркости источников.

Таблица 1

Разности в прямом восхождении, мкс дуги

	GAIA	ICRF2	баз.	мульти.	дв.
GAIA		-43	-40	-39	-55
ICRF2	-43		-2	-3	10
баз.	-40	-2		-1	25
мульти.	-39	-3	-1		25
дв.	-55	10	25	25	

Таблица 2

Разности в склонении, мкс дуги

	GAIA	ICRF2	баз.	мульти.	дв.
GAIA		120	63	57	76
ICRF2	120		-38	-48	-36
баз.	63	-38		-5	-9
мульти.	57	-48	-5		7
дв.	76	-36	-9	7	

Таблица 3

СКО в прямом восхождении, мкс дуги

	GAIA	ICRF2	баз.	мульти.	дв.
GAIA		551	535	527	621
ICRF2	551		61	71	110
баз.	535	61		18	28
мульти.	527	71	18		32
дв.	621	110	28	32	

Таблица 4

СКО в склонении, мкс дуги

	GAIA	ICRF2	баз.	мульти.	дв.
GAIA		475	551	547	597
ICRF2	475		77	94	188
баз.	551	77		22	41
мульти.	547	94	22		102
дв.	597	188	41	102	

Заключение и предстоящие исследования

Впервые получены каталоги координат радиоисточников из глобальной обработки РСДБ-наблюдений с применением моделей структурной задержки. При этом систематические разности и СКО по сравнению с каталогом ICRF2 увеличиваются на 10–20 %, а по сравнению с каталогом GAIA уменьшаются на 1–10 %. Применение двухкомпонентной модели не показывает удовлетворительных результатов, полученный каталог имеет существенные систематические ошибки.

Необходимо дальнейшее изучение природы выбросов в величинах изменения задержки при некоторых углах ориентации базы. Они могут быть обусловлены как особенностями структуры, так и численной неустойчивостью модели. Также возможно проведение специальных долговременных наблюдений источников со сложной структурой для получения оценок изменения структурной задержки по данным суточных наблюдений на одной базе.

Литература

1. *Finkelstein A. M., Ipatov A. V., Skurikhina E. A., Surkis I. F., Smolentsev S. G., Fedotov L. V.* Geodynamic observations on the quasar VLBI network in 2009–2011 // *Astronomy Letters*. — 2012. — Vol. 38. — P. 394–398.
2. *Charlot P.* Radio-Source Structure in Astrometric and Geodetic Very Long Baseline Interferometry // *AJ* — 1990. — Vol. 99. — P. 1309–1326.
3. *Fey A. L., Kingham K. A., Gaume R. A.* The USNO Radio Reference Frame Image Database // *American Astronomical Society Meeting Abstracts*. — 1998. — P. 837.
4. *Pushkarev A. B., Kovalev Y. Y.* Single-epoch VLBI imaging study of bright active galactic nuclei at 2 GHz and 8 GHz // *Astronomy and Astrophysics*. — 2012. — Vol. 34. — P. 544.
5. *Kurdubov S. L., Gubanov V. S.* Main results of the global adjustment of VLBI observations // *Astronomy Letters*. — 2011. — Vol. 37. — P. 267–275.
6. *Mignard F. et al.* Gaia Data Release 1 Reference frame and optical properties of ICRF sources // *Astronomy and Astrophysics*. — 2016. — Vol. A5. — P. 595.
7. *Fey A. L. et al.* The Second Realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry // *AJ* — 2015. — Vol. 150. — P. 58.
8. *Суркис И. Ф., Губанов В. С.* Обработка РСДБ-наблюдений: Программный пакет QUASAR. I. Редукция данных наблюдений // *Сообщения ИПА РАН*. — 2002. — Вып. 141.

Structural Delays in the VLBI Data Analysis

V. Gubanov, S. Kurdubov, S. Mironova, I. Surkis

The main astrometric radio source position catalogues which are used to create the ICRF are obtained currently without the radio source structure taken into account. The latest attempts to use the data about the source structure have produced the catalogues which cannot be compared with the catalogues of other analysis centres, as they do not use these data. However, now we have the GAIA optical catalogue, therefore we can make comparisons with it. We have used the two component dipole and the multicomponent source structure models which had been implemented by the QUASAR's software. Several different solutions built are shown that the multicomponent model reduces the differences in the catalogue's positions as compared to the GAIA catalogue.

Keywords: radio source positions, ICRF, structural delay.