

УДК 521.9

Об одной возможности использования наблюдений пульсаров в астрометрии

Е. П. Федоров

Обсуждается возможность применения наблюдений пульсаров для определения положения экваториальной системы координат относительно системы отсчета, образованной ортами, направленными к внегалактическим источникам радиоизлучения. Метод основан на совместном использовании интерферометрических наблюдений и регистрации моментов прихода импульсов.

ON POSSIBILITY OF SOME USE OF PULSAR OBSERVATIONS IN ASTROMETRY, by Fedorov E. P.— The paper deals with using pulsar interferometric and time-of-arrival observations for linking the dynamic equatorial coordinate system to a reference frame attached to extragalactic radio sources.

В литературе по физике нередко отмечается необходимость делать различие между понятиями *система отсчета* и *система координат* [1, 6, с. 308]. Некоторые исследователи, особенно в последнее время, высказывают мнение, что такое различие следует делать и в астрономии [15].

Согласно общему определению, система отсчета* — это система материальных тел, снабженных часами, по отношению к которой определяются места наблюдаемых событий или, иначе говоря, положение мировых точек в четырехмерном пространстве — времени. Однако в астрометрии для построения систем отсчета используются не сами небесные тела, а соединяющие их векторы. До сих пор в качестве основной системы отсчета применялся пучок единичных векторов (ортов), направленных от барицентра Солнечной системы к фундаментальным звездам. Сходный (но не тождественный) смысл имеет термин *звездный компас*, которым пользуется В. Л. Гинзбург [2, с. 45]. Он называет так наблюдаемую «совокупность световых лучей, давным давно испущенных звездами». Теперь предлагается вместо звезд использовать внегалактические источники радиоизлучения и таким путем получить жесткую систему отсчета**. Возникает вопрос, как по отношению к ней определить положение экваториальной системы координат, которая и в дальнейшем будет во многих случаях применяться в астрометрии и теоретической астрономии. В [12] как один из возможных путей решения этой задачи предлагается привлечь результаты наблюдения пульсаров. (Позже, независимо от названных исследователей, то же предложение высказал Коле [11]. При этом он привел некоторые соображения о возможной точности предлагаемого метода.) Рассмотрим простейшую схему такого решения.

Основную систему координат (Q) жестко свяжем с пучком ортов, направленных к внегалактическим источникам радиоизлучения (главным образом квазарам). Ее начало целесообразно совместить с бари-

* В английской литературе этому термину соответствует *reference frame*. Однако, как отмечают Ковалевский и Мюллер [18], общепринятых определений терминов *coordinate system*, *reference system*, *reference frame* не выработано, и ими пользуются несколько произвольно.

** Примером такой системы отсчета может служить каталог JPL 1982—4 Лаборатории реактивного движения (США), в котором содержатся положения 111 внегалактических источников радиоизлучения [13].

центром O , осям можно придать произвольные направления. Пусть q — орт, направленный от начала O к какому-либо небесному телу Q ; g и h — сферические координаты этого орта в системе (Q) . Обозначим символами k и n орты нормалей к плоскостям мгновенного экватора и эклиптики соответственно, а символом i — орт линии пересечения этих плоскостей. Очевидно

$$i = (k \times n) / \sin \varepsilon, \quad (1)$$

где ε — угол между названными плоскостями. Орты i , $j = k \times i$ и k образуют базис мгновенной экваториальной системы координат (E) . Сферические координаты орта q в этой системе обозначим, как обычно, буквами α и δ . Рассматриваемая задача состоит в нахождении положения ортов k и n в системе координат (Q) .

Для упрощения выкладок воспользуемся возможностью произвольного выбора направления осей системы (Q) : как и в работе [7], проведем их так, чтобы совмещение систем (Q) и (E) можно было осуществить последовательными поворотами первой из них вокруг ее координатных осей на малые углы u , v , w . Пренебрегая квадратами и произведениями этих углов, получим связывающую координаты произвольного орта q в системах (Q) и (E) следующую формулу:

$$\begin{pmatrix} \cos \delta \cos \alpha \\ \cos \delta \sin \alpha \\ \sin \delta \end{pmatrix} = (I + \sigma) \begin{pmatrix} \cos h \cos g \\ \cos h \sin g \\ \sin h \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где I — единичная матрица, а

$$\sigma = \begin{pmatrix} 0 & w & -v \\ -w & 0 & u \\ v & -u & 0 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Из формулы (2) следует

$$\delta - h = -u \sin g + v \cos g. \quad (4)$$

Заметим, что v и $-u$ — проекции орта k на оси системы (Q) . Их можно определить по наблюдениям только двух пульсаров, написав для каждого уравнения вида (4).

Определение координат пульсаров g , h в системе (Q) осуществляется путем их дифференциальных наблюдений совместно с ближайшими квазарами, для чего применяются интерферометры с различными базами.

Склонения пульсаров в истинной экваториальной системе получаются из наблюдений абсолютным способом [4]. Опубликовано лишь несколько результатов таких наблюдений. Склонения получались со средними ошибками, близкими к $0.2''$.

Остановимся на том, как по регистрации моментов прихода последовательных импульсов от пульсара можно определить положение плоскости эклиптики относительно основной системы координат (Q) . Техника регистрации описана в работе [5]. Пусть t — момент прихода импульса в точку наблюдения, отсчитанный по атомным часам наблюдателя, r — барицентрический радиус-вектор указанной точки, найденный для этого момента по принятой эфемериде Земли. Время пробега импульса от барицентра O до наблюдателя изменяется с годичным периодом. Амплитуда этих изменений a зависит от широты пульсара β .

Обработка наблюдений ведется по следующей схеме. Сначала вычисляются показания T часов, покоящихся в системе (Q) , в момент прихода в барицентр O каждого импульса, зарегистрированного наблюдателем. Эти показания обычно аппроксимируют кубическим многочленом t , после чего анализируют остаточные отклонения ΔT последовательных значений T от кривой, полученной путем такого сглаживания.

Чтобы найти расстояние, которое пробегает импульс на пути от барицентра O до наблюдателя, представим орт q через его проекции на оси эклиптических координат. Тогда искомое расстояние будет X_0q , где

$$X_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varepsilon_0 & \sin \varepsilon_0 \\ 0 & -\sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Теперь можно записать

$$T = t + (1/c) X_0 q \cdot r + \mu + \nu, \quad (6)$$

где μ — разность между координатным временем и собственным временем наблюдателя, зависящая от средней аномалии Земли [10]; ν — поправка за влияние свободных электронов в межзвездной среде на групповую скорость радиоволн.

Появление годовых волн в остаточных уклонениях ΔT может вызываться тремя причинами:

1. Поворотом системы (Q) вокруг оси OX не было достигнуто полного совпадения этой системы с системой (E) . В таком случае понадобятся дополнительные повороты вокруг координатных осей на малые углы u' , v' , которые могут несколько отличаться от углов u , v и определяются из наблюдений. Следовательно, вместо X_0 необходимо ввести матрицу

$$(I + \sigma') X_0, \quad (7)$$

где

$$\sigma' = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -v' \\ 0 & 0 & u' \\ v' & -u' & 0 \end{pmatrix}.$$

2. Наблюдения, посредством которых осуществляется привязка пульсаров к внегалактическим объектам, содержат ошибки. Возникает необходимость введения поправок к координатам пульсара в системе (Q) или, иначе говоря, замена орта q в уравнении (6) на

$$q' + \Delta q = \frac{\partial q}{\partial g} \Delta g + \frac{\partial q}{\partial h} \Delta h.$$

3. Нуждаются в исправлении барицентрические радиусы-векторы Земли r . Поправка Δr — функция поправок средних элементов орбиты Земли, кроме тех, которые задают положение ее плоскости в системе (Q) , поскольку последние учитываются введением матрицы σ' .

Пренебрегая квадратами и произведениями малых величин u' , v' , $|\Delta q|$ и $|\Delta r|$, можно записать выражение годового члена в остаточных уклонениях ΔT в следующем виде:

$$(xv' - yu') \sin \beta + X \left(\frac{\partial q}{\partial g} \Delta g + \frac{\partial q}{\partial h} \Delta h \right) \cdot r + X q \cdot \Delta r = c \Delta T \quad (8)$$

Для нашей задачи — определения положения базиса экваториальной системы координат относительно основной системы (Q) — важен первый член левой части этого уравнения. Рассматривая задачу в первом приближении, отбросим второй и третий члены, поскольку из дифференциальных интерферометрических наблюдений координаты пульсара в системе (Q) определяются с высокой точностью. То же можно сказать об определении элементов Земли по радарным наблюдениям. При таком упрощении для нахождения углов u' , v' в принципе достаточно иметь значения ΔT при двух положениях Земли на орбите.

Пусть эти значения получены из наблюдений, выполненных в моменты t_1 и t_2 , когда эфемеридные координаты Земли были x_1 , y_1 и x_2 ,

y_2 соответственно. Тогда углы u' , v' находим из совместного решения следующих уравнений:

$$x_1 v' - y_1 u' = c \operatorname{cosec} \beta \Delta T_1, \quad x_2 v' - y_2 u' = c \operatorname{cosec} \beta \Delta T_2. \quad (9)$$

Чтобы такое решение стало возможным, надо допустить, что за время $t_2 - t_1$ углы u' , v' не изменились. В действительности это, конечно, не так. Из-за вращения плоскости эклиптики угол u' изменяется на $0.5''$ в год, угол v' — значительно медленнее. Эти изменения можно учесть с избыточной точностью, воспользовавшись уравнениями прецессии от планет, и таким путем привести значения углов u_1' , v_1' и u_2' , v_2' к среднему моменту наблюдений $0.5(t_2 + t_1)$. Придется также учитывать в уравнении (9) изменения широты пульсара β , обусловленные его параллаксом и собственным движением. Они довольно уверенно определяются из радиоинтерферометрических наблюдений.

Орт нормали к плоскости эклиптики в основной системе представим в виде следующего вектора-столбца:

$$\mathbf{n} = \begin{pmatrix} v' \\ -\sin \varepsilon \\ \cos \varepsilon \end{pmatrix}, \quad \varepsilon = \varepsilon_0 + u'. \quad (10)$$

Координаты точки весеннего равноденствия в той же системе обозначим буквами G и H и, воспользовавшись уравнением (1), получим

$$\mathbf{i} = \begin{pmatrix} 1 \\ G \\ H \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ v' \operatorname{cosec} \varepsilon - v \operatorname{ctg} \varepsilon \\ v \end{pmatrix}, \quad \mathbf{j} = \mathbf{k} \times \mathbf{i} = \begin{pmatrix} -G \\ 1 \\ -u \end{pmatrix}, \quad \mathbf{k} = \begin{pmatrix} v \\ -u \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Так определяется положение базиса мгновенной экваториальной системы координат (E) относительно основной системы координат (Q), а значит, и относительно системы отсчета, образованной ортами направлений на внегалактические источники радиоизлучения. В принципе для такого определения достаточно выполнить радиоинтерферометрические наблюдения двух пульсаров в один момент времени и регистрацию прихода импульсов в два момента времени.

Возможен несколько иной вывод положения орта \mathbf{n} в основной системе координат (Q). На первом этапе по уклонениям ΔT определяются не углы u' , v' , а экваториальные координаты пульсаров, которые обозначим α_T , δ_T *. Индекс T вводится, чтобы отличить их от координат α , δ , получаемых в системе (E) из абсолютных наблюдений с интерферометрами. На вопросе о нуль-пункте прямых восхождений при таких наблюдениях остановимся позже. Сохраним в левой части уравнения (8) только второй член. Тогда для каждого из наблюдаемых пульсаров (например, i -го) можно составить систему уравнений вида

$$\frac{\partial \mathbf{q}_i}{\partial g_i} (g - \alpha_T)_i + \frac{\partial \mathbf{q}_i}{\partial h_i} (h - \delta_T)_i = c \Delta T, \quad (12)$$

где $\frac{\partial \mathbf{q}_i}{\partial g_i}$, $\frac{\partial \mathbf{q}_i}{\partial h_i}$ — известные функции координат g_i и h_i . В простейшем случае $i = 1, 2$.

На втором этапе анализируются значения разностей $(g - \alpha_T)_i$ и $(h - \delta_T)_i$, найденные из решения системы (12). В них могут содержаться систематические уклонения, обусловленные несовпадением осей системы (Q) и экваториальной системы (E), годовой член, амплитуда и

* Маррей в монографии [21] вместо экваториальных координат рассматривает поправки эклиптических.

начальная фаза которого зависят от углов u' , v' , что в принципе позволяет определить эти углы.

На практике пока ограничивались только попытками выяснить, есть ли такая возможность в действительности. Бартел и др. [9] определили относительным способом, т. е. в системе (Q), координаты пульсара PSR 1133+16. Для этого они воспользовались антеннами в Эффельсберге (ФРГ), Грин-Бэнк и Биг-Пейн (США), а также процессором Марк III. Результаты, полученные методом регистрации сигналов, были взяты из [19]. По мнению Бартела и др. [9], разности координат $g - a_T = 0.056 \pm 0.008^s$, $h - \delta_T = -0.9 \pm 0.3''$, если они значимы, можно приписать главным образом различию в ориентации двух систем координат — основной системы (Q) и той, в которой получают положения пульсаров по регистрации моментов прихода импульсов.

С этим мнением не согласуются выводы авторов [14], основанные на значительно более обширном материале наблюдений. В работе [14] координаты 59 пульсаров в системе (Q) найдены из наблюдений с очень большой антенной системой (VLA) Национальной радиоастрономической обсерватории США [3]. Ошибки этих координат лежат в пределах $\Delta g = 0.007 - 0.0059^s$ и $\Delta \delta = 0.1 - 1.0''$. Координаты a_T , δ_T они заимствовали из нескольких других публикаций и получили 56 разностей, которые и были проанализированы. Выяснилось, что существенно уменьшить их относительным поворотом систем (Q) и (E) не удается: среднее значение квадратов разностей сокращается только на 20%. На этом основании авторы [14] отказались от попыток определить абсолютную систему координат обсуждаемым здесь методом, хотя, как они отмечают в заключении, «данные, которые нужны для такого определения, в принципе, существуют».

Вкратце остановимся на оценке ожидаемой точности рассматриваемого способа. Джонстон [17] отмечает, что интерферометры со сверхдлинными базами уже оправдали надежды, возлагавшиеся на них в конце 1950-х гг.; если в 1972 г. погрешность $0.1''$ в положении квазара считалась показателем высокой точности, то теперь уровень ошибок снизился до $0.005''$. Точность интерферометров со связанными элементами, в том числе и VLA, естественно несколько ниже — около $0.02''$.

Положения пульсаров в системе (Q), т. е. координаты g , h , определяются дифференциальным способом путем привязки к внегалактическим источникам, обычно находящимся не далее 5° . Обсуждение результатов таких относительных определений содержится в статьях [14, 22]. Поскольку при накоплении наблюдений приходится находить и учитывать собственные движения и параллаксы пульсаров, точность результатов будет несколько снижаться. Их ошибки зависят от типа инструмента и прежде всего от длины его базы. Например, из наблюдений с VLA склонения 59 пульсаров были получены со средними ошибками, находящимися в пределах $0.1 - 0.6''$, тогда как интерферометры со сверхдлинными базами дают ошибки на порядок меньше. По-видимому, мы не преувеличим точность привязки пульсаров к радиоинтерферометрической системе, если примем $0.2''$ для оценки средней ошибки координат пульсара в этой системе.

Перейдем к оценке точности второго метода — регистрации прихода импульсов. Момент t определяется вписыванием стандартного шаблона импульса в средний профиль, полученный путем суммирования нескольких тысяч последовательных импульсов. Это позволяет определить фазу импульса с погрешностью 10^{-4} периода. Значит, если наблюдается пульсар с периодом вращения 500 мс, можно принять $\Delta t = 0.05$ мс как оценку точности регистрации времени прихода импульсов или случайной ошибки $\sigma_{\Delta t}$ углений ΔT . По определению, широта пульсара β_T — угол, который плоскость эклиптики образует с ортом q . Отсюда следует, что $|T - t| \leq \tau_A \cos \beta_T$, где τ_A — астрономическая еди-

ница, выраженная в световых секундах. Значит

$$\sigma_{\beta} \geq \frac{\sigma_{\Delta T}}{\tau_A \sin \beta_T} \text{ радиан} = \frac{0.02''}{\sin \beta_T}.$$

Несколько большую оценку ошибок положения 37 пульсаров получили из наблюдений Хельфанд и др. [16]. Эти исследователи пришли к выводу о том, что одного года удачно распределенных по времени наблюдений обычно оказывается достаточно для определения положения пульсара в системе (E) с ошибкой около $0.2''$. Со случайной ошибкой того же порядка можно, вероятно, определить углы u' , v' .

Однако, по-видимому, значения этих углов искажены систематическими ошибками. Действительно, авторы работы [14] обнаружили их при анализе разностей $g - \alpha_T$ и $h - \delta_T$. Источником этих ошибок могут быть, в частности, погрешности принятой эфемериды Земли (в уравнение (9) они вносятся членом $X_{0q} \cdot \Delta T$). При выводе α_T , δ_T одни исследователи пользовались эфемеридой Земли MIT, заимствованной из статьи [8], другие — эфемеридой DE 96 (JPL). При обработке наблюдений 17 пульсаров использовались обе эфемериды, что позволило получить для каждого из этих пульсаров разности координат $g - \alpha_T$, $h - \delta_T$, взятые в смысле (VLA—MIT и VLA—JPL). Были обнаружены значимые систематические расхождения.

Причиной появления годовой волны в отклонениях ΔT могут быть ошибки масс планет, принятых при переходе от гелиоцентрической к барицентрической системе координат. Так, по расчетам Малхолланда [20], замена массы Плутона, которая в 1964 г. была принята MАС равной 360 000, новым значением 1 812 000 (JPL) сместила барицентр Солнечной системы на 13 000 км, что вызвало изменение времени прихода импульса от пульсара на 43 мс.

Среди систематических ошибок, выявленных авторами [14], были и такие, происхождение которых объяснить не удалось, что позволило им сделать вывод: «До тех пор, пока остается невыясненным происхождение систематических расхождений между положениями, определенными посредством VLA и путем регистрации прихода импульсов, точность, с которой можно определить нуль-пункт прямых восхождений и наклон эклиптики, будет ниже, чем при традиционных методах».

Это, конечно, не должно стать основанием для отказа от дальнейших опытов применения наблюдений пульсаров для решения одной из наиболее важных задач астрометрии: уточнения движения экваториальной системы координат относительно жесткой системы отсчета, образованной ортами внегалактических объектов. По мере накопления интерферометрических наблюдений будут существенно уточняться параллаксы и собственные движения пульсаров, а значит, и приведение наблюдений, выполненных в разное время, к единой эпохе. Это позволит полностью использовать преимущества рассмотренного метода. Важно, что отпадает необходимость комбинировать наблюдения объектов разной природы, выполняемые различными инструментами (одними — в радиодиапазоне, другими — в оптическом), что, как известно, представляло в других методах основные трудности. В противоположность этому *все наблюдения пульсаров для определения их положения в системе (Q) и для привязки к ним плоскостей экватора и эклиптики выполняются только радиотехническими средствами.*

Важно и то, что простота принципиальной основы рассмотренного способа может помочь избавиться от неясностей, обнаруживаемых и теперь при трактовке некоторых вопросов астрометрии.

1. Владимиров Ю. С., Мицкевич Н. Е., Хорски Я. Пространство, время, гравитация.— М.: Наука, 1984.—207 с.
2. Гинзбург В. Л. О теории относительности.— М.: Наука, 1979.—238 с.
3. Губанов В. С., Финкельштейн А. М., Фридман П. А. Введение в радиоастрометрию.— М.: Наука, 1983.—279 с.

4. Жонголович И. Д., Валяев В. И., Малков А. А., Сабанина Т. Б. Использование радиометра со сверхдлинной базой при решении ряда основных проблем астрономии, геодезии и геодинамики // Тр. Ин-та теорет. астроном. АН СССР.— 1977.— Вып. 16.— С. 19—58.
5. Манчестер Р., Тейлор Дж. Пульсары.— М.: Мир, 1980.—282 с.
6. Мицкевич Н. Е. О различии понятий «система отсчета» и «система координат» // Физическая наука и философия.— М.: Наука, 1973.— С. 300—306.
7. Федоров Е. П. О связи радиоинтерферометрической и экваториальной координатных систем // Письма в Астрон. журн.— 1981.—7, № 10.— С. 632—635.
8. Ash M. E., Shapiro I. I., Smith W. B. Astronomical constants and planetary ephemerides deduced from radar and optical observations // Astron. J.— 1967.—72, N 3.— P. 338—350.
9. Bartel N., Cappollo R. J., Ratner M. I. et al. MARK III VLBI observations of pulsars // IAU Symp. 110, «VLBI and compact radio sources».— Dordrecht: Reidel, 1984.— P. 275—276.
10. Clemence G. M., Szebehely V. Annual variation of an atomic clock // Astron. J.— 1967.—72, N 10.— P. 1324—1326.
11. Cole T. W. Absolute radio-source right ascension // Observatory.— 1976.—96, N 1015.— P. 244—245.
12. Counselman C. C., Shapiro I. I. Scientific uses of pulsars // Science.— 1968.—162, N 3851.— P. 352—355.
13. Fanselow J. L., Sovers O. J., Thomas J. B., Purcell J. H. An improved celestial radio reference frame // JPL 1982—4. Techn. interferometrie tres grad base. Colloq. Intern.— Toulouse, 1983.— P. 183—197.
14. Fomalont E. B., Goss W. M., Lyne A. G., Manchester R. N. Astrometry of 59 pulsars: a comparison of interferometric and timing positions // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.— 1984.—210, N 1.— P. 113—130.
15. Gaposhkin E. M. Kinematic and dynamic reference frames // IAU Colloq. 56, «Reference coordinate systems for Earth dynamics».— Dordrecht: Reidel, 1981.— P. 59—70.
16. Helfand D. J., Taylor T. H., Backus P. R., Cordes J. M. Pulsar timing. I. Observations from 1970 to 1978 // Astrophys. J.— 1980.—237, N 1.— P. 206—215.
17. Johnston K. J. Radio astrometry // IAU Symp. 110, «VLBI and compact radio sources».— Dordrecht: Reidel, 1984.— P. 339—346.
18. Kovalevsky J., Mueller I. I. Comments on conventional terrestrial and quasi-inertial reference systems // IAU Colloq. 56, «Reference coordinate systems for Earth dynamics».— Dordrecht: Reidel, 1981.— P. 357—384.
19. Manchester R. N., Taylor J. H. Observed and derived parameters for 330 pulsars // Astron. J.— 1981.—86, N 12.— P. 1953—1960.
20. Mulholland J. D. The system of planetary masses as error sources in pulsar timing // Astrophys. J.— 1971.—165, N 1.— P. 105—107.
21. Murray C. M. Vectorial astrometry.— Bristol, 1983.—358 p.
22. Taylor J. H., Gwinn C. R., Weisberg J. M., Rowley L. A. Pulsar astrometry // IAU Symp. 110, «VLBI and compact radio sources».— Dordrecht: Reidel, 1984.— P. 347—353.

Глав. астроном. обсерватория АН УССР,
Киев

Поступила в редакцию 07.01.86,
после доработки 14.02.86

РЕФЕРАТ ДЕПОНИРОВАННОЙ РУКОПИСИ

УДК 523.44—323

НАБЛЮДЕНИЯ МАЛЫХ ПЛАНЕТ В ГАО АН УССР В 1976 г. / Головня В. В., Майор С. П., Мороз Г. В.

(Рукопись деп. в ВИНТИ; № 3584—В86)

Кратко описана методика наблюдений малых планет с помощью двойного астрографа 400/2000. Приведены 27 положений 13 малых планет.