

АСТРОНОМИЯ, АСТРОФИЗИКА И КОСМОЛОГИЯ

Оценивание видимых движений внегалактических радиоисточниковН. А. Воронков^{1,a}, В. Е. Жаров^{1,2,b}¹ Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга (ГАИШ МГУ).
Россия, 119991, Москва, Университетский пр-т, д. 13.² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра
небесной механики, астрометрии и гравиметрии. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.
E-mail: ^a nvoronkov@mail.ru, ^b vladzh2007@yandex.ru

Статья поступила 07.09.2012, подписана в печать 18.02.2013.

Получены оценки видимых движений 573 внегалактических радиоисточников. Для этого использованы 3193 сеанса наблюдений на радиоинтерферометрах со сверхдлинными базами (РСДБ) с 1984 по 2010 г. Для решения применялся метод наименьших квадратов с ограничениями. Показано, что основная часть радиоисточников, включая и «определяющие» (defining), демонстрирует значимое видимое движение. Так как стабильность небесной системы координат определяется отсутствием глобального вращения (no-net-rotation, или NNR) относительно определяющих источников, то изменение их координат приводит к вращению осей небесной системы координат (НСК). Поэтому мы считаем, что видимые движения радиоисточников должны приводиться в каталогах.

Ключевые слова: внегалактические радиоисточники, небесные системы координат, РСДБ.

УДК: 521.9; 520.274. PACS: 95.10.Jk.

Введение

Международный астрономический союз (МАС) определил небесную систему координат (НСК) (International Celestial Reference System — ICRS) как систему с началом в барицентре Солнечной системы, положение экватора которой задано на стандартную эпоху J2000.0. Направление осей системы согласовано для преемственности с осями фундаментального каталога звезд FK5 [1]. Положение осей задается координатами специально отобранных компактных внегалактических радиоисточников (сюда входят квазары, активные ядра галактик, блазары), которые наблюдались на РСДБ. Стабильность осей системы обеспечивается положениями так называемых «определяющих» радиоисточников и гипотезой, что из-за большого расстояния до них их собственные движения пренебрежимо малы. Считается также, что координаты этих источников известны с самой высокой, достигнутой на сегодняшний день в астрометрии, точностью.

Новая система [2] заменила оптическую систему FK5 [1] и используется с 1 января 1998 г.

Каталог положений 608 радиоисточников [2] был получен по наблюдениям на РСДБ с 1979 по 1995 г. и стал первой реализацией Международной опорной небесной системы отсчета (International Celestial Reference Frame — ICRF). Для увеличения плотности источников на небесной сфере к 212 определяющим источникам были добавлены 294 «кандидата» и 102 «прочих», координаты которых измерены с худшей точностью.

Позже, в 2004 г. вышло дополнение (ICRF-Ext.1) [3] к каталогу [2], в котором содержатся координаты еще 109 источников.

В соответствии с резолюцией В3 XXVII Генеральной Ассамблеи МАС новой реализацией небесной системы

координат (или ICRF2) являются два каталога [4]. Первый из них считается основным каталогом, второй — дополнительным. Всего в обоих каталогах 3414 источников, из них 2197 наблюдались по 1–2 раза. В основном каталоге 1217 источников, среди них выделены 295 определяющих.

Новая реализация ICRF2 заменила старую с 1 января 2010 г. в соответствии с резолюцией МАС [4].

При подготовке нового каталога радиоисточников рабочей группой МАС были проанализированы данные наблюдений на РСДБ за период 1980–2008 гг. Первой целью этого сравнения было сопоставление временных рядов (поправки к принятым координатам источников) различными группами исследователей, которые при этом использовали разные программы редукции и анализа данных РСДБ. Второй целью работы группы было разделение источников (селекция) на «стабильные» и «нестабильные» вместо принятого ранее деления источников ICRF на «определяющие», «кандидаты» и «прочие».

Анализ временных рядов поправок к принятым координатам источников показал, что многие из них показывают значимые видимые движения. В отличие от пренебрежимо малых собственных движений величины видимых движений могут достигать нескольких десятков дуговых микросекунд в год и могут быть надежно измерены по многолетним наблюдениям на РСДБ. Эти движения были проанализированы в работе [5]. Они могут быть связаны с прецессией джета квазара и отражают движение в пространстве излучающей области джета. В англоязычной литературе эта область называется ядром джета (jet core), и собственно она является радиоисточником, координаты которого измеряются на РСДБ.

Оказалось, что многие из определяющих источников обладают значимым видимым движением, что должно

приводить к нестабильности НСК [6]. Если механизм прецессии является обычным для квазаров, то видимые движения излучающих областей (ядер джетов или источников ICRF) будут иметь величины от единиц до десятков дуговых микросекунд в год в зависимости от периода прецессии и расстояния до квазара. Однако в каталоге ICRF2 приводятся лишь координаты источников на эпоху J2000.0, т.е. видимые движения не учитываются.

Предполагая, что *все* источники ICRF должны иметь видимые движения или скорости, в работе [7] был предложен новый метод селекции, основанный на космологическом критерии. Поскольку все источники движутся, то оказалось трудным делом применить к ним термин «стабильные». Поэтому было решено оставить термин «определяющие», но в соответствии с новым критерием к таким источникам предполагалось отнести все источники с красным смещением z от 0.8 до 3, обладающие в среднем минимальными скоростями.

В работе получен новый каталог радиисточников. Каталог включает координаты и видимые движения в отличие от ICRF2.

1. Редукция РСДБ-наблюдений

Редукция наблюдений на радиointерферометре со сверхдлинной базой основывается на стандартах Международной службы вращения Земли (IERS Conventions 2003, 2010) [8, 9]. В стандартах дается определение земной и небесной систем координат, определение матрицы преобразования W между этими системами и параметров, входящих в матрицу W , определение шкал времени в разных системах отсчета и преобразования моментов времени из одной системы в другую, приводятся численные значения констант, а также алгоритмы вычисления приливных и неприливных смещений пунктов, расположенных на поверхности Земли. Кроме того, приводятся формулы для оценки задержки радио- и оптических сигналов в атмосфере Земли.

Если обозначить один из телескопов первым, а другой — вторым, то вектор \mathbf{b} , равный $\mathbf{b} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$, называется вектором базы, где $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ — радиус-векторы телескопов в барицентрической небесной системе координат (BCRS).

В BCRS задержка записывается в виде:

$$t_2 - t_1 = -\frac{1}{c} \mathbf{s} \cdot [\mathbf{r}_2(t_2) - \mathbf{r}_1(t_1)] + \Delta\tau_{\text{grav}}, \quad (1)$$

где \mathbf{s} — единичный вектор в направлении источника из барицентра Солнечной системы в отсутствии гравитационного отклонения света и абберационного смещения, $\mathbf{r}_1(t_1), \mathbf{r}_2(t_2)$ — барицентрические радиус-векторы телескопов в моменты t_1, t_2 (по шкале барицентрического координатного времени (ТСВ)) прихода фронта волны на телескопы, $\Delta\tau_{\text{grav}}$ — гравитационная задержка радиосигнала в Солнечной системе.

Уравнение (1) преобразуется в уравнение для геоцентрической задержки. Для этого используются формулы релятивистского преобразования векторов $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ из барицентрической небесной системы координат в соответствующие векторы $\mathbf{r}'_1, \mathbf{r}'_2$ в геоцентрической небесной системе координат (GCRS) и промежуток времени $t_2 - t_1$ (ТСВ) в промежуток земного времени TT:

$\Delta t' = t'_2 - t'_1$. Решая эти два уравнения, можно выразить геоцентрическую задержку через геоцентрический вектор базы $\mathbf{b}' = \mathbf{r}'_2 - \mathbf{r}'_1$. Все вычисления проводятся на момент t'_1 прихода плоского фронта волны на радиотелескоп 1.

Для наземного интерферометра формула для групповой задержки сигнала в геоцентрической системе координат равна

$$\Delta t' = \frac{\Delta\tau_{\text{grav}}}{1 + \frac{1}{c} \mathbf{s} \cdot (\mathbf{V}_{\oplus} + \boldsymbol{\omega}_2)} - \frac{\frac{1}{c} (\mathbf{s} \cdot \mathbf{b}') \left[1 - \frac{2U(\mathbf{r}_{\oplus})}{c^2} - \frac{|\mathbf{V}_{\oplus}|^2}{2c^2} - \frac{\mathbf{V}_{\oplus} \cdot \boldsymbol{\omega}_2}{c^2} \right] - \frac{1}{c^2} (\mathbf{V}_{\oplus} \cdot \mathbf{b}') \left(1 + \frac{\mathbf{V}_{\oplus} \cdot \mathbf{s}}{2c^2} \right)}{1 + \frac{1}{c} \mathbf{s} \cdot (\mathbf{V}_{\oplus} + \boldsymbol{\omega}_2)}, \quad (2)$$

где \mathbf{s} — единичный вектор направления на радиосточник на эпоху J2000, $U(\mathbf{r}_{\oplus})$ — гравитационный потенциал в геоцентре, \mathbf{V}_{\oplus} — барицентрическая скорость геоцентра, $\boldsymbol{\omega}_2$ — геоцентрическая скорость 2-го телескопа, c — скорость света.

После того как получено выражение задержки сигнала для РСДБ, можно найти расчетные значения задержки (τ_c), которые равны геометрическим значениям плюс поправки за атмосферу и рассинхронизацию часов.

Расчетная задержка τ_c получается путем добавления к $\Delta t'$ задержки в тропосфере и ионосфере, а также поправки за рассинхронизацию часов:

$$\tau_c = \Delta t' + \frac{\delta D_2 - \delta D_1}{c} + [(\tau_{\text{ion}})_2 - (\tau_{\text{ion}})_1] + C_0 + C_1(t - \bar{t}) + \frac{1}{2} C_2(t - \bar{t})^2, \quad (3)$$

где $\delta D_1, \delta D_2$ — тропосферная задержка для телескопов 1 и 2; ионосферная задержка $(\tau_{\text{ion}})_1, (\tau_{\text{ion}})_2$ находится очень точно, если наблюдения велись одновременно на двух частотах; C_0, C_1, C_2 — коэффициенты квадратичного полинома, описывающего рассинхронизацию часов на телескопах 1 и 2. Основной вклад в ошибку вычисления τ_c вносит неточность вычисления задержки в тропосфере, вызванной наличием водяного пара в тропосфере.

Этот этап в соответствии с традициями астрометрии можно назвать редукцией РСДБ-наблюдений.

Современная точность измерения групповой задержки составляет в среднем $\sim 3 \cdot 10^{-11}$ с, или 30 пкс. Поэтому точность вычисления задержки (точность модели наблюдений) должна быть не хуже 1 пкс (в линейной мере ~ 0.3 мм).

Для вычисления задержки с точностью ~ 1 пкс необходимо знать координаты вектора базы с точностью ~ 0.3 мм или с относительной погрешностью $\sim 10^{-10}$ при длинах баз $\sim 3 \div 5$ тыс. км. С аналогичной точностью необходимо предвычислять взаимную ориентацию вектора базы и вектора направления на источник. Взаимная ориентация этих векторов изменяется вследствие вращения Земли, изменения ориентации Земли в инерциальном пространстве, приливных и тектонических движений пунктов РСДБ и т.д. Таким образом, все эти явления должны быть учтены при моделировании задержки с относительной ошибкой, не превышающей $\sim 10^{-10}$.

Зная аналитическое выражение для задержки, можно найти ее частные производные по различным параметрам, в частности координатам и скоростям радиоисточников.

Поэтому на *втором* этапе обработки для каждого наблюдения разность измеренной и вычисленной задержки представляется в виде разложения по малым параметрам — поправкам к принятым значениям параметров p_i модели:

$$\tau_o - \tau_c = \sum_i^N \frac{\partial \tau_c}{\partial p_i} \Delta p_i, \quad (4)$$

причем число параметров N может быть различным в зависимости от конкретной задачи. В результате процедуры линеаризации получается система условных уравнений, матрица плана которой состоит из частных производных.

На *третьем* этапе выполняется оценивание параметров модели. Чаще всего для этого используется метод наименьших квадратов. Решение системы условных уравнений (4) дает поправки Δp_i к параметрам, которые нас интересуют.

2. Метод решения

Система условных уравнений (4) описывает зависимость наблюдаемой задержки сигнала РСДБ-наблюдений от неизвестных параметров. Оценивание параметров осуществляется при помощи многомерной линейной регрессии. Неизвестными являются параметры вращения Земли, величины, описывающие сухую и влажную задержку в тропосфере, рассинхронизацию часов, а также координаты и скорости телескопов, координаты и видимые движения источников.

Для оценки неизвестных параметров применяется метод наименьших квадратов. Особенность предложенного в статье метода заключается в возможности обработки от отдельных сеансов РСДБ-наблюдений до всей базы данных в целом (несколько тысяч сеансов).

2.1. Многогрупповая оценка

В рассматриваемой модели линейной регрессии оцениваемые параметры можно разделить на две группы: группу глобальных и группу локальных параметров. Группа глобальных параметров включает координаты и скорости телескопов, координаты и видимые движения радиоисточников, которые оцениваются для всего интервала наблюдений. Локальные параметры, включающие параметры вращения Земли, влажную и сухую задержку сигнала в тропосфере и рассинхронизацию часов на телескопах, рассчитываются для каждого сеанса отдельно.

Дополнительно координаты и видимые движения источников должны удовлетворять условию отсутствия глобального вращения небесной системы координат (no-net-rotation, или NNR). Подобное условие применяется и для координат телескопов (для земной системы координат). Исходя из этих предположений строится система ограничений, которая позволяет найти оценку параметров с заданными условиями.

2.2. Многомерная линейная регрессия

Модель многомерной линейной регрессии в матричной форме имеет вид [10]

$$\mathbf{X} = Z\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad M\boldsymbol{\varepsilon} = 0, \quad (5)$$

где каждое из k наблюдений $\mathbf{X} = (X_1, \dots, X_k)$ ($X_i = \tau_o^i - \tau_c^i$, $i = 1, \dots, k$) представлено в виде линейной зависимости от l неизвестных параметров $\boldsymbol{\beta} = (\beta_1, \dots, \beta_l)$, $\boldsymbol{\varepsilon}$ — случайная ошибка. $Z = [\partial \tau_c / \partial p_i]$ — матрица частных производных. Дополнительно на вектор $\boldsymbol{\beta}$ накладываются условия в виде линейных равенств

$$\mathbf{d} = B\boldsymbol{\beta}. \quad (6)$$

Для получения приближенной оценки неизвестных параметров воспользуемся методом наименьших квадратов с ограничениями [11]. Применим метод «взвешивания»:

$$\min_{\boldsymbol{\beta}} \left\| \begin{pmatrix} Z \\ \lambda B \end{pmatrix} \boldsymbol{\beta} - \begin{pmatrix} \mathbf{X} \\ \lambda \mathbf{d} \end{pmatrix} \right\|_2. \quad (7)$$

При увеличении значения λ оценка $\boldsymbol{\beta}(\lambda)$ приближается к точному решению задачи с ограничениями $\tilde{\boldsymbol{\beta}}$. Введем следующие обозначения:

$$A = \begin{bmatrix} Z \\ \lambda B \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \lambda \mathbf{d} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

С учетом соотношений (8) задача принимает следующий вид:

$$\min_{\boldsymbol{\beta}} \|A\boldsymbol{\beta} - \mathbf{Y}\|_2. \quad (9)$$

Оценка $\hat{\boldsymbol{\beta}}(\lambda)$ может быть получена из решения системы нормальных уравнений

$$A^T A \hat{\boldsymbol{\beta}} = A^T \mathbf{Y}, \quad (10)$$

откуда

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (A^T A)^{-1} A^T \mathbf{Y}. \quad (11)$$

Рассмотрим матрицы Z и B подробнее. Запишем их в блочном виде, где n характеризует количество сеансов наблюдений:

$$Z = \begin{bmatrix} S_1^{\text{in}} & S_1^{\text{ex}} & 0 & \dots & 0 \\ S_2^{\text{in}} & 0 & S_2^{\text{ex}} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_n^{\text{in}} & 0 & 0 & \dots & S_n^{\text{ex}} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$B = \begin{bmatrix} R_1^{\text{in}} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R_1^{\text{ex}} & 0 & \dots & 0 \\ R_2^{\text{in}} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & R_2^{\text{ex}} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_n^{\text{in}} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & R_n^{\text{ex}} \end{bmatrix}.$$

Рассмотрим матрицу $G = A^T A$:

$$G = \begin{bmatrix} K & L_1 & L_2 & \dots & L_n \\ L_1^T & C_1 & 0 & \dots & 0 \\ L_2^T & 0 & C_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_n^T & 0 & 0 & \dots & C_n \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где

$$K = \sum_{j=1}^n (S_j^{\text{in}})^T S_j^{\text{in}} + \lambda^2 \sum_{j=1}^n (R_j^{\text{in}})^T R_j^{\text{in}}, \quad (14)$$

$$L_j = S_j^{\text{in}T} S_j^{\text{ex}}, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (15)$$

$$C_j = S_j^{\text{ex}T} S_j^{\text{ex}} + \lambda^2 (R_j^{\text{ex}})^T R_j^{\text{ex}}, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (16)$$

Вектор $\mathbf{u} = A^T \mathbf{Y}$ запишем в виде

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n (S_j^{\text{in}})^T \mathbf{X}_j + \lambda^2 \sum_{j=1}^n (R_j^{\text{in}})^T \mathbf{d}_j \\ (S_1^{\text{ex}})^T \mathbf{X}_1 + \lambda^2 (R_1^{\text{ex}})^T \mathbf{d}_1 \\ \vdots \\ (S_n^{\text{ex}})^T \mathbf{X}_n + \lambda^2 (R_n^{\text{ex}})^T \mathbf{d}_n \end{bmatrix}. \quad (17)$$

2.3. Оценка параметров

С учетом соотношений (13), (17) систему нормальных уравнений запишем в виде

$$G \hat{\boldsymbol{\beta}} = \mathbf{u}. \quad (18)$$

Разделим вектор $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ на группы параметров:

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = \left(\hat{\boldsymbol{\beta}}^0, \hat{\boldsymbol{\beta}}^1, \dots, \hat{\boldsymbol{\beta}}^n \right)^T. \quad (19)$$

Уравнения для определения $\hat{\boldsymbol{\beta}}^0$ можно записать в виде

$$\left[K - \sum_{j=1}^n L_j C_j^{-1} L_j^T \right] \hat{\boldsymbol{\beta}}^0 = \left[\mathbf{u}_0 - \sum_{j=1}^n L_j C_j^{-1} \mathbf{u}_j \right], \quad (20)$$

или

$$F \hat{\boldsymbol{\beta}}^0 = \mathbf{f}. \quad (21)$$

Перегруппировав члены в рядах для определения F , запишем оценку $\hat{\boldsymbol{\beta}}_t^0$, $t = 1, 2, \dots, n$:

$$\hat{\boldsymbol{\beta}}_t^0 = \hat{\boldsymbol{\beta}}_{t-1}^0 + N_t \mathbf{f}_{t-1} + F_{t-1}^{-1} \mathbf{m}_t + N_t \mathbf{m}_t, \quad (22)$$

где

$$F_t = F_{t-1} + \left((S_t^{\text{in}})^T S_t^{\text{in}} + \lambda^2 (R_t^{\text{in}})^T R_t^{\text{in}} - L_t C_t^{-1} L_t^T \right) = F_{t-1} + M_t, \quad (23)$$

$$M_t = (S_t^{\text{in}})^T S_t^{\text{in}} + \lambda^2 (R_t^{\text{in}})^T R_t^{\text{in}} - L_t C_t^{-1} L_t^T, \quad (24)$$

$$\mathbf{f}_t = \mathbf{f}_{t-1} + \left((S_t^{\text{in}})^T \mathbf{X}_t + \lambda^2 (R_t^{\text{in}})^T \mathbf{d}_t - L_t C_t^{-1} \mathbf{u}_t \right) = \mathbf{f}_{t-1} + \mathbf{m}_t, \quad (25)$$

$$\mathbf{m}_t = (S_t^{\text{in}})^T \mathbf{X}_t + \lambda^2 (R_t^{\text{in}})^T \mathbf{d}_t - L_t C_t^{-1} \mathbf{u}_t, \quad (26)$$

$$N_t = - (F_{t-1} + M_t)^{-1} M_t F_{t-1}. \quad (27)$$

Представим матрицу G в виде четырех блоков:

$$G = \begin{bmatrix} K & L \\ L^T & C \end{bmatrix}. \quad (28)$$

Обратная матрица G^{-1} выражается следующим образом [12]:

$$G^{-1} = \begin{bmatrix} Q^{-1} & -Q^{-1} L C^{-1} \\ -C^{-1} L^T Q^{-1} & C^{-1} + C^{-1} L^T Q^{-1} L C^{-1} \end{bmatrix}, \quad (29)$$

где

$$Q = K - L C^{-1} L^T = K - \sum_{j=1}^n L_j C_j^{-1} L_j^T. \quad (30)$$

Для оценки $\hat{\boldsymbol{\beta}}^i$ воспользуемся соотношением

$$\hat{\boldsymbol{\beta}}^i = C^{-1} \left(\mathbf{u}_i - L_i^T \hat{\boldsymbol{\beta}}^0 \right), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (31)$$

Оценка остаточной дисперсии:

$$\hat{s}^2 = \frac{1}{k-l-1} \left(\mathbf{Y} - A \hat{\boldsymbol{\beta}} \right)^T \left(\mathbf{Y} - A \hat{\boldsymbol{\beta}} \right). \quad (32)$$

Интервальная оценка с надежностью γ будет иметь следующий вид [13]:

$$\hat{\boldsymbol{\beta}}^0 \in \left\{ \hat{\boldsymbol{\beta}}^0 \pm t_\gamma \hat{s} Q_{jj}^{1/2} \right\}, \quad j = 1, 2, \dots, l_0, \quad (33)$$

где t_γ распределение Стьюдента с $(k-l-1)$ степенями свободы.

3. Результаты

Предложенный метод был применен для оценки видимых движений внегалактических радиоисточников. Было обработано 3193 суточных сеанса РСДБ-наблюдений с 1984 по 2010 г. Решение было получено с учетом ограничений на поправки к координатам и видимым движениям источников, а также на поправки к координатам и скоростям телескопов. Полученный результат для координат и видимых движений источников удовлетворяет отсутствию глобального вращения небесной системы координат. Система ограничений (6) записана согласно следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N -\sin(\delta_i) \cos(\delta_i) \cos(\alpha_i) d\alpha_i + \sin(\alpha_i) d\delta_i &= 0, \\ \sum_{i=1}^N -\sin(\delta_i) \cos(\delta_i) \sin(\alpha_i) d\alpha_i + \sin(\alpha_i) d\delta_i &= 0, \\ \sum_{i=1}^N \cos^2(\delta_i) d\alpha_i &= 0, \end{aligned} \quad (34)$$

где α_i и δ_i — прямое восхождение и склонение i -го источника, $d\alpha_i$ и $d\delta_i$ — поправки к прямому восхождению и склонению i -го источника, N — количество источников.

Для ограничений на положения телескопов используются соотношения отсутствия глобального вращения земной системы координат:

$$\sum_{i=1}^M \frac{[d\mathbf{x}_i \times \mathbf{x}_i]}{|\mathbf{x}_i|^2} = 0, \quad (35)$$

где \mathbf{x}_i — радиус-вектор положения i -го телескопа в земной системе координат, $d\mathbf{x}_i$ — поправка к радиус-вектору положения i -го телескопа, M — количество телескопов.

На рис. 1 представлено распределение видимых движений радиоисточников. В южном полушарии источников заметно меньше, чем в северном. Этот эффект связан с недостаточным количеством наблюдающих станций в южной части планеты. Из гистограмм (рис. 2, 3) видно, что большое количество источников имеют значительные видимые движения. Более половины рассмотренных источников имеют видимые движения, превышающие 50 мкс дуги в год. Поэтому можно сделать предположение, что это явление носит неслучайный характер и подтверждает ранее полученные выводы, основанные на анализе временных рядов [6].

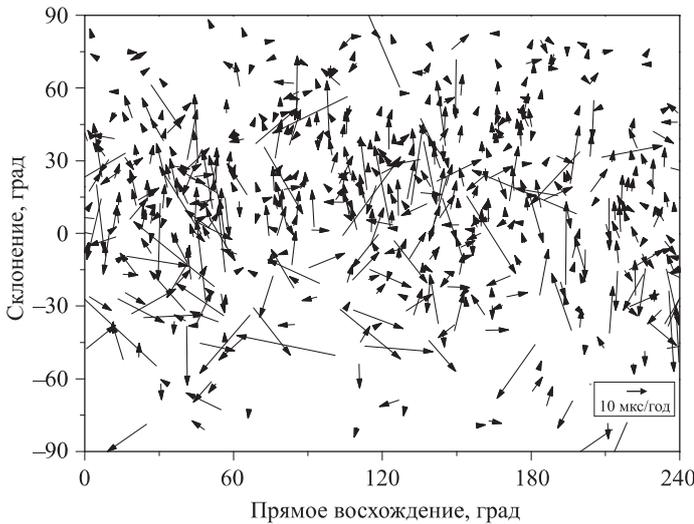


Рис. 1. Распределение видимых движений радиоисточников в зависимости от прямого восхождения и склонения

Как было сказано, основной целью отбора определяющих источников, является создание стабильной системы отсчета, что означает неподвижность осей системы в пространстве. Так как направление осей задается координатами определяющих источников, то отсутствие у них видимых движений и определяет стабильность системы. Рассматривая определяющие источники (V_α — видимое движение по прямому восхождению в микросекундах в год, V_δ — видимое движение по склонению в дуговых микросекундах в год): 0016 + 731 ($V_\alpha = -2.8 \pm 0.1$; $V_\delta = 6 \pm 2$), 0042 – 097 ($V_\alpha = -0.4 \pm 0.1$; $V_\delta = 46 \pm 2$), 0059 + 581 ($V_\alpha = -0.8 \pm 0.2$; $V_\delta = 1 \pm 1$), 0104 – 408 ($V_\alpha = 0.4 \pm 0.2$; $V_\delta = 36 \pm 3$), 0119 + 115 ($V_\alpha = -0.3 \pm 0.1$; $V_\delta = 43 \pm 3$) и др., можно видеть, что их видимые движения имеют значимые величины, что неизбежно приводит к вра-

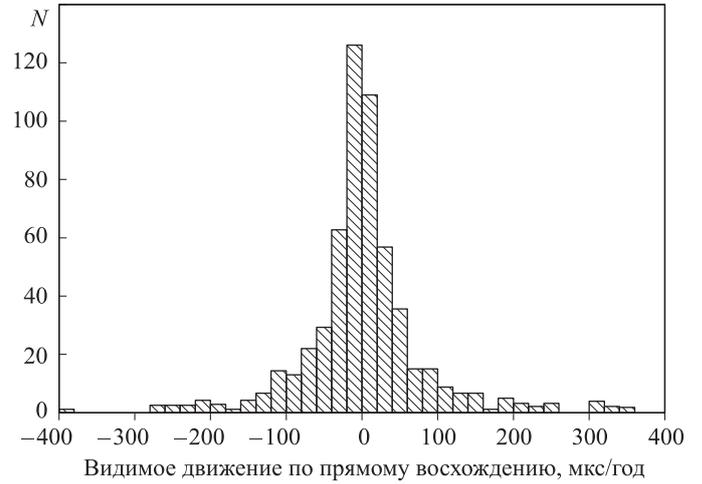


Рис. 2. Гистограмма распределения видимых движений по прямому восхождению

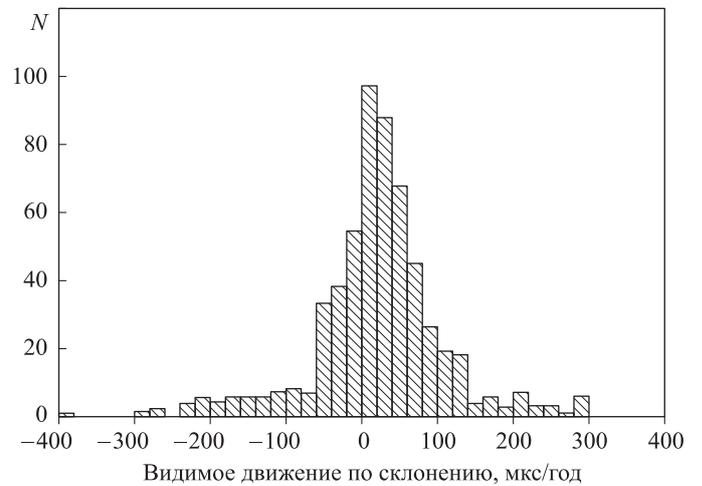


Рис. 3. Гистограмма распределения видимых движений по склонению

щению системы отсчета. Для оценки ее стабильности были вычислены три малых угла θ_1 , θ_2 , θ_3 , которые описывают малые вращения:

$$\mathbf{s}(t) = \begin{pmatrix} 1 & -\theta_3 & \theta_2 \\ \theta_3 & 1 & -\theta_1 \\ -\theta_2 & \theta_1 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{s}(t_0), \quad (36)$$

где $\mathbf{s}(t)$, $\mathbf{s}(t_0)$ — единичные векторы направления на источник в моменты t и $t_0 = J2000.0$. Из вычислений следует, что видимые движения определяющих источников могут привести к повороту системы с 2000 по 2015 г. на $\theta_1 \sim 70$ мкс дуги, $\theta_2 \sim 50$ мкс дуги и $\theta_3 \sim 10$ мкс дуги.

Заключение

Выполнена обработка наблюдений на РСДБ с 1984 по 2010 г. Получен каталог внегалактических радиоисточников, включающий видимые скорости. Показано, что большое число источников (из 573 оцененных источников 339 имеют скорости, превышающие 50 мкс дуги в год) имеют значимые видимые движения. Эти скорости должны быть включены в каталог. Движение

источников приводит к вращению небесной системы координат.

Авторы выражают благодарность профессору М.В. Сажину за обсуждение и полезные дискуссии при написании работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 11-02-01-009, 10-02-00961) и Минобрнауки РФ (госконтракты № 14.740.11.0885, 14.740.11.0085).

Список литературы

1. *Fricke W., Schwan H., Lederle T.* et al. Fifth fundamental catalogue (FK5). Pt. 1: The basic fundamental stars. Veroff. Astron. Rechen-Institut Heidelberg. Verlag G. Braun, Karlsruhe. N 32. 1988. P. 1.
2. *Ma C., Arias E.F., Eubanks T.M.* et al. // *Astron. Astrophys.* 1998. **116**. P. 516.
3. *Fey A.L., Ma C., Arias E.F.* et al. // *Astron. J.* 2004. **127**. P. 3587.
4. *Ma C., Arias E.F., Bianco G.* et al. The second realization of the International celestial reference frame by very long baseline interferometry / Ed. by A. Fey, D. Gordon, C.S. Jacobs. (IERS Technical Note N 35.) Frankfurt am Main, 2009.
5. *Жаров В.Е., Сажин М.В., Семенов В.Н.* и др. // *Астрон. журн.* 2009. **86**. С. 627.
6. *Zharov V.E., Sazhin M.V., Sementsov V.N.* et al. // *Relativity in Fundamental Astronomy. Proc. IAU Symposium N 261* / Ed. by S.A. Klioner, P.K. Seidelman, M.H. Soffel. 2009. P. 50.
7. *Sazhin M.V., Sementsov V.N., Zharov V.E.* et al. Cosmological and kinematical criteria for the ICRF2 sources selection. arXiv: 0904.2146v1 [astro-ph.CO] 14 Apr 2009.
8. *McCarthy D.D., Petit G.* et al. IERS Conventions (2003). IERS Technical Note 32. U.S. Naval Observatory, Bureau International des Poids et Mesures. 2004.
9. IERS Conventions (2010). IERS Technical Note 36 / Ed. by G. Petit, B. Luzum. Frankfurt am Main, 2010.
10. *Дрейпер Н., Смит Г.* Прикладной регрессионный анализ. Кн. 1. М., 1986.
11. *Loan C., van* // *SIAM J. Numer. Analysis.* 1985. **22**. P. 851.
12. *Магнус Я.Р., Нейдеккер Х.* Матричное дифференциальное исчисление с приложениями к статистике и эконометрике. М., 2002.
13. *Айвазян С.А.* Прикладная статистика. Основы эконометрики. Т. 2. М., 2001.

Estimation of the apparent motion of the extragalactic radio sources

N. A. Voronkov^{1,a}, V. E. Zharov^{1,2,b}

¹ *P. K. Sternberg State Institute of Astronomy, Moscow State University, Moscow 119191, Russia.*

² *Department of Sky Mechanics, Astrometry, and Gravimetry, Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.*

E-mail: ^a nvoronkov@mail.ru, ^b vladzh2007@yandex.ru.

In our article estimates of the apparent motion of 573 extragalactic radio sources were obtained. To do this we processed 3193 session of the very long baseline interferometry (VLBI) observations from 1984 to 2010. The solution was obtained by the least squares method with constraints. It was shown that the main part of the radio sources (including defining sources) have a significant apparent motion. Stability of the celestial reference system is ensured by the condition of the no-net-rotation (NNR) relative to the defining sources. Variation of the coordinates is lead to a rotation axis of celestial reference system.

Keywords: extragalactic radiosources, celestial reference system, VLBI.

PACS: 95.10.Jk.

Received 7 September 2012.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 3(2013).

Сведения об авторах

1. Воронков Николай Александрович — вед. инженер; тел.: тел.: (495) 939-37-64, e-mail: nvoronkov@mail.ru.

2. Жаров Владимир Евгеньевич — докт. физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой, зав. лабораторией; тел.: (495) 939-37-64, e-mail: vladzh2007@yandex.ru.