Мультипольный анализ видимых движений опорных радиоисточников

М. В. Сажин[1,a], О. С. Сажина[1], В. Н. Семенцов[1,b], М. Н. Сиверский[2], В. Е. Жаров[2], К. В. Куимов[1]

[1] *Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга (ГАИШ МГУ). Россия, 119991, Москва, Университетский проспект, 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] *moimaitre@mail.ru*, [b] *valera@sai.msu.ru*

Статья поступила 19.12.2015, подписана в печать 10.03.2016.

В настоящей работе проанализированы видимые движения квазаров, являющихся опорными источниками небесной системы отсчета ICRS. Использованы кинематические параметры из 4 каталогов, составленных разными научными группами. Поле собственных движений было разложено по специальному набору векторных функций на сфере, которые являются неприводимым представлением группы вращений $O(3)$. По коэффициентам разложения сделана оценка степени неинерциальности барицентрической системы отсчета, вызванной обращением Солнечной системы вокруг центра Галактики. Рассчитаны направление и модуль вектора ускорения, они сопоставлены с альтернативными оценками. Использованный метод обсуждается как способ проверки закона Ньютона на больших масштабах.

Ключевые слова: небесная система отсчета, вращение Галактики, релятивистская аберрация.

УДК: 521.96, 524.6-327, 524.77. PACS: 98.35.Df, 98.54.–h, 95.80.+p.

Введение

Квазары являются одними из самых ярких объектов во Вселенной. Более 30 лет их наблюдают при помощи сети радиотелескопов [1, 2]. Ввиду их исключительной яркости, большой удаленности (красные смещения большинства квазаров лежат в диапазоне $z = 0.2$–7) и, как следствие, высокой стабильности положения они использовались при создании небесной системы отсчета ICRF как опорные источники и считались неподвижными.

Однако сейчас накоплено достаточное количество точных наблюдений квазаров для получения статистически значимых оценок величин их собственных движений. Характерный диапазон — это 10–100 мкс дуги в год [3].

Собственные движения такой величины кажутся неожиданными для источников столь удаленных. Для объекта с красным смещением $z = 1$ при характерной скорости в картинной плоскости $v = 1000$ км/с можно получить собственные движения ≈ 0.1 мкс дуги в год, в то время как измеренные величины оказываются на два порядка больше. Во многих случаях линейная скорость оказывается выше скорости света, что входит в противоречие с СТО. Следует отметить, что в природе могут наблюдаться сверхсветовые движения, но они не должны быть связаны с переносом массы и информации.

Еще одна возможная причина сверхсветового движения — это нестационарность пространства-времени, а именно: гравитационное линзирование, гравитационные волны и поля, вносящие вклад в изменение коэффициента преломления среды, из-за чего может возникнуть иллюзия сверхсветового движения [4–7]. В этом случае будет наблюдаться корреляция в движении близких источников.

Помимо перечисленного выше, есть вклад изменения вековой аберрации, неучтенной при обработке РСДБ-данных, когда аберрационная поправка меняется из-за медленного ($\sim 2.6 \cdot 10^{-8}$ рад/год) поворота вектора скорости барицентра Солнечной системы по отношению к Галактике. При современной точности определения скорости видимого движения можно выделить только этот эффект [8, 9].

Работа состоит из трех основных частей: 1) обработка каталогов; 2) описание моделей и их преобразования; 3) расчет параметров ускорения. На первом этапе производится предварительная обработка каталогов, вычисление некоторых их характеристик, проверка корректности приведенных данных. Затем каталоги используются для расчета двух моделей. Одна модель описывает вековую аберрацию и ее изменение со временем. В ней три параметра — три компоненты вектора ускорения наблюдателя — барицентра Солнечной системы. Эту модель будем называть «модель 1».

Вторая модель («модель 2») переводит каталоги из координатного пространства в функциональное (векторное поле на сфере разлагается по векторному набору сферических гармоник). Независимых параметров там $4\left(2l_{\max}+l_{\max}^2\right)$, но после наложения условия действительности значений удается сократить их число вдвое, здесь $l_{\max} \in \mathbb{N}$ — главный порядок векторной сферической гармоники.

Следует отметить, что «модель 1» можно представить в виде «модели 2», положив $l_{\max} = 1$ и обнулив

несколько коэффициентов. Тем не менее, «модель 1» непосредственно следует из физических соображений, поэтому избыточной она не является. Две модели были нужны для получения возможности сравнивать результаты и находить потенциальные промежуточные вычислительные ошибки в случае серьезного расхождения параметров. Обе модели позволяют найти вектор ускорения наблюдателя в системе координат ICRS, в которой представлены каталоги.

1. Каталоги видимых движений

Использованы четыре различных каталога видимых движений, которые содержат кинематические параметры нескольких сотен внегалактических радиоисточников (положение, компоненты скорости, ошибки положения и скорости), а также в отдельных случаях красное смещение. В каталогах видимых движений использованы разные варианты обработки одних и тех же данных РСДБ-наблюдений. Два каталога видимых движений были составлены О. Титовым [10], остальные два — В. Е. Жаровым и Н. А. Воронковым [11]. Далее в тексте они обозначены соответственно T1, T2, Z и V.

Определять параметры кинематических моделей можно по разным каталогам, а также используя их подмножества, объединения и пересечения. Первое, что было целесообразно проверить, — как каталоги соответствуют друг другу, близки ли параметры одних и тех же источников в разных каталогах. В следующих разделах приведены примеры, демонстрирующие некоторые эвристические утверждения относительно исходных данных. В работе с реальными данными часто нет полной информации об их происхождении, качестве, точности и корректности.

В табл. 1, 2 приведены различные корреляции внутри самих каталогов и между ними. В первой таблице указаны коэффициенты корреляции между α- и δ-компонентами собственных движений внутри каталогов, а также число радиоисточников. При отсутствии систематической составляющей можно ожидать, что результат будет близок к нулю. Это далеко не так для T1 и Z. В табл. 2 показано, как каталоги соответствуют друг другу, для этого были вычислены коэффициенты корреляции между каталогами (по подмножеству общих источников) для μ_α и μ_δ. Априори казалось, что эти корреляции должны быть близки к единице, но все далеко не так, т. е. каталоги друг другу не соответствуют. Полужирным шрифтом выделены числа, которые лежат выше ожидаемых величин, курсивом — те, которые малы, по сравнению с ожидаемыми. Обусловлено это, видимо, малой статистикой и низкой точностью данных.

Рис. 1 иллюстрирует, с какими данными велась работа. На рис. 2 наглядно показано, что каталог T1 — самый новый из трех (T1, T2, Z), в каталоге V не было указано число сеансов наблюдений для источников, поэтому сравнение с ним не производилось. Если бы T1 не был самым новым по времени (следовательно, там было бы меньше наблюдений для каждого из источников), то пики распределений были бы справа от вертикальной линии. Поскольку это не так, а в этой области есть только небольшие пики, предлагается объяснение, что хотя каталог T1 более поздний, но при его создании у некоторых объектов не учитывались (или отбрасывались) отдельные старые наблюдения.

Таблица 1

Коэффициенты корреляции между компонентами скорости в каталогах

Каталог	T1	T2	Z	V
Объектов в каталоге	555	687	355	573
$\mathrm{corr}(v_\alpha, v_\delta)$	**−0.314**	−0.006	**−0.385**	−0.083

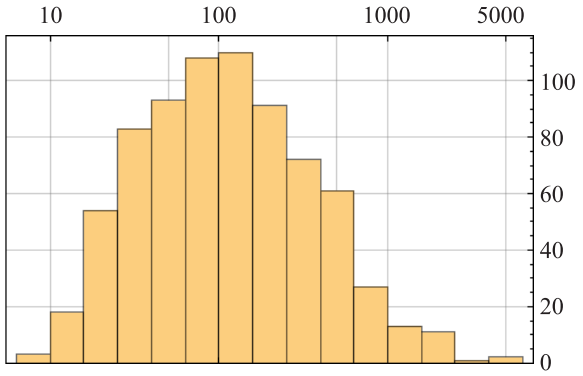

Рис. 1. Распределение модуля скорости $|\boldsymbol{\mu}|$ по всем каталогам и по всем источникам. Для источников, имеющихся в нескольких каталогах, бралось среднее значение модуля скорости по каталогам, где он присутствовал

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между каталогами

Сравниваемые каталоги	T1 ∼ T2	T1 ∼ Z	T1 ∼ V	T2 ∼ Z	T2 ∼ V	Z ∼ V
Общих объектов	506	317	462	355	549	352
$\mathrm{corr}(\mu^i, \mu^j)$	*0.164*	*0.071*	0.213	0.685	0.395	0.296
$\mathrm{corr}(\mu^i_\alpha, \mu^j_\alpha)$	*0.134*	*0.043*	0.222	*0.053*	0.235	0.201
$\mathrm{corr}(\mu^i_\delta, \mu^j_\delta)$	*0.042*	*−0.045*	*−0.107*	0.6	*0.135*	0.193

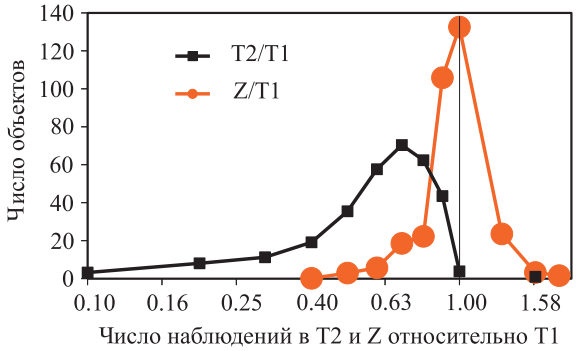

Рис. 2. Число сессий наблюдений источников для T2 и Z, нормированное на значения в каталоге T1 для тех же объектов. Рисунок наглядно показывает, что каталог T1 самый новый из представленных, так как статистически наблюдений для каждого квазара в нем больше. Информация для V отсутствует. Вертикальная линия символизирует единичную границу равенства числа сессий наблюдения с T1

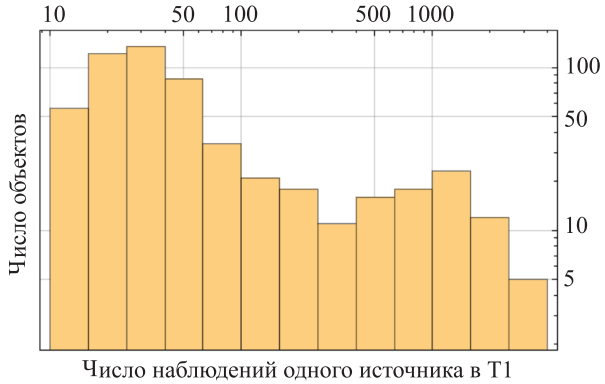

Рис. 3. Распределение числа сессий наблюдений в T1

Из рис. 3 можно сделать вывод, что есть две группы источников. У одной группы чаще всего встречается порядка 30 наблюдений на источник, у другой порядка 1000. Ясно, что первая группа была добавлена всего за несколько лет до создания T1. В дальнейшем будет показано, как влияет учет мультимодальности на результаты МНК-обработки.

Рис. 4, как и рис. 1, приведен для справки. Характерная относительная ошибка 0.5–1. Каталог V выделяется тем, что характерные относительные ошибки там в ~ 10 раз меньше, чем в остальных

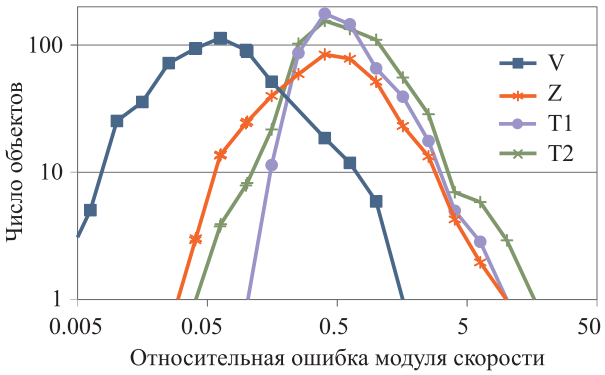

Рис. 4. Относительная ошибка модуля скорости для всех каталогов

каталогах. Это, а также чрезмерно большие величины ускорений заставили отказаться от дальнейшего его рассмотрения.

Итого при обработке каталогов были сделаны следующие выводы.

1. Каталог T1 новее T2 и Z, судя по числу сессий наблюдения радиоисточников. Разумно априорно считать его наиболее точным и использовать как базу для сравнения с другими каталогами.

2. В T1 присутствуют две группы источников, у одной группы примерно 30 наблюдений по медиане, у другой примерно 1000. Можно было бы разделить этот каталог на две части и смотреть на зависимость результатов от способа разбиения на группы. Это было проделано в статье [8].

3. В каталоге V средняя относительная ошибка в 10 раз ниже, чем в остальных. Ускорение, которое было получено при обработке этого каталога, оказывалось в ~ 15 раз больше, чем на остальных данных. Кроме того, в нем отсутствует информация по тому, сколько раз наблюдался каждый из источников. Совокупность перечисленных причин заставила в дальнейшем не рассматривать V вообще.

4. Характерные корреляции между компонентами скоростей < 0.3. Одна из возможных причин — наличие сигнала в данных. При этом компоненты скоростей являются зависимыми и так или иначе может возникнуть корреляция между ними. Корреляция между двумя случайными массивами чисел длиной 500, которые распределены логнормально, никак не может дать уровень ~ 0.3, который все же достигается в T1 и Z.

2. Модели для обработки

Изменение вековой аберрации (модель 1). Аберрация — явление изменения направления на светило при движении по сравнению с покоящимся наблюдателем. Угол между видимым и истинным направлениями на светило остается постоянным, если скорость наблюдателя постоянна. Если же скорость непостоянна, возникнет эффект дрейфа аберрации и светило в общем случае начнет двигаться с точки зрения наблюдателя. Этот эффект вносит вклад в движение всех источников в поле зрения, скорости будут коррелировать даже у источников, разнесенных на десятки градусов, и даже если ошибки в определении скорости отдельного источника велики, то из-за того, что их много, все еще можно выделить значимый сигнал.

Пусть наблюдатель находится в барицентре Солнечной системы (далее СС), движется со скоростью $\boldsymbol{V}$ и ускорением $\boldsymbol{A}$, и истинное положение наблюдаемого источника $\boldsymbol{K}$. Тогда видимое положение $\boldsymbol{k}$ на момент времени t будет определяться соотношением ниже:

$$\boldsymbol{k} = \boldsymbol{K} + \boldsymbol{K} \times (\boldsymbol{V} \times \boldsymbol{K})/c + \boldsymbol{K} \times (\boldsymbol{A} \times \boldsymbol{K})t/c. \quad (1)$$

Продифференцировав формулу (1) по времени и подставив типичные численные значения рассто-

яния до центра Галактики и скорости СС, получим, что из-за дрейфа вековой аберрации максимальная видимая скорость источников будет наблюдаться в направлении, перпендикулярном вектору ускорения и составлять 4.2 мкс дуги в год [13]. В физических единицах это соответствует ускорению $1.94 \cdot 10^{-10}$ м/с^2. Сама же вековая аберрация составляет 2.5′ [2].

Приведем зависимость компонент видимой скорости источника μ_l и μ_b в галактической системе координат от компонент ускорения наблюдателя. Эти выражения можно получить из (1), продифференцировав по времени, подставив компоненты векторов в декартовой системе координат, векторно перемножив и переведя компоненты скорости из декартовой системы координат в галактическую. Конечный вид выражения

$$\begin{gathered}\mu_l \cos(b) = (-A_x \sin l + A_y \cos l)/c, \\ \mu_b = (-A_x \sin b \cos l - A_y \sin b \sin l + A_z \cos b)/c.\end{gathered} \tag{2}$$

Здесь компоненты ускорения $\boldsymbol{A}$ записаны в декартовой системе координат, начало которой совпадает с барицентром СС, плоскость XY лежит в плоскости Галактики, ось X направлена на ее центр, l и b — галактические координаты.

Из формул (2) ясно, что по известным для ряда источников величинам $\{\mu_l, \mu_b, l, b\}$ можно определить по МНК вектор ускорения $\boldsymbol{A} = \{A_x, A_y, A_z\}$. Соотношение (2) назовем «модель 1». Формулы (2) являются частным случаем более общих выражений. Будет произведено полное разложение поля скоростей по специальным гармоникам, и получившиеся коэффициенты будут содержать в себе в том числе и вектор ускорения.

На рис. 5 приведен пример векторного поля скоростей источников, которое отражает вековую аберрацию из-за ускорения наблюдателя. Изображена небесная сфера со стороны, стрелки обозначают угловую скорость источников в данной точке, длина вектора показывает абсолютное значение скорости. На рис. 6 приведен пример квадрупольного векторного поля скоростей источников, которое возникает, например, из-за действия космологических гравитационных волн.

Мультипольное разложение поля скоростей (модель 2). При разложении скалярной функции из коэффициентов $a_{l,m}$ можно составить величину C_l, которая инвариантна относительно вращений и не зависит от выбора системы координат:

$$C_l = \frac{1}{2l+1} \sum_{m=-l}^{l} |a_{l,m}|^2. \tag{3}$$

Выражения такого типа часто используются в исследованиях реликтового излучения и именно по вращательно-инвариантному спектру оценивают разные космологические параметры. Однако в нашем случае надо использовать не скалярные, а векторные гармоники [14]. Можно было бы раскладывать компоненты поля в ряд по $Y_{l,m}$, однако

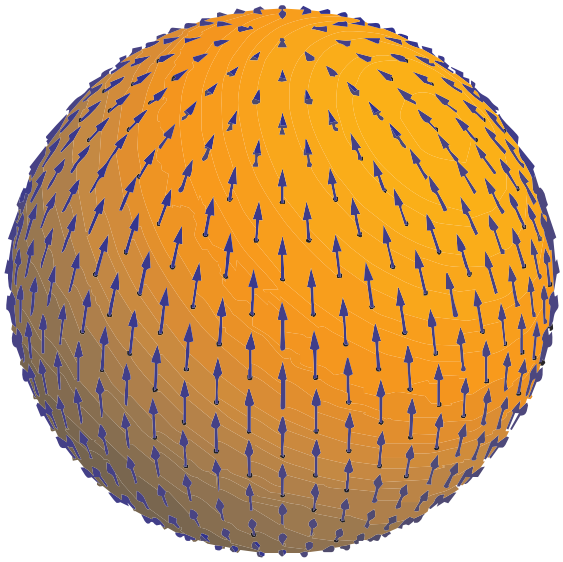

Рис. 5. Пример видимого поля скоростей источников при ускорении наблюдателя вдоль оси Z

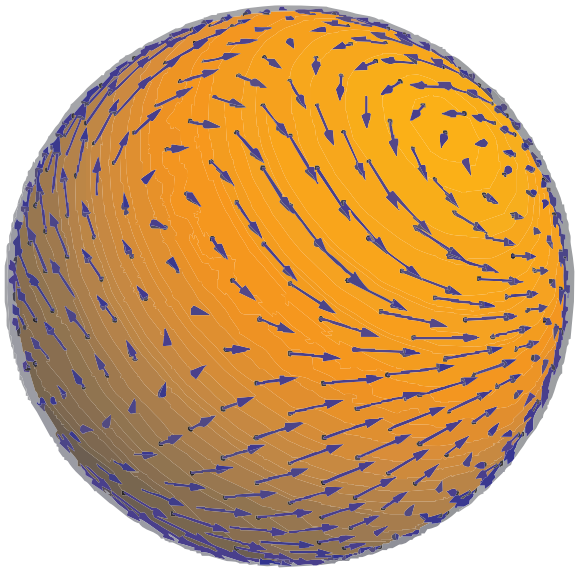

Рис. 6. Пример векторного поля, которое является реальной частью суммы двух векторных сферических гармоник $\mathrm{Re}\left(\boldsymbol{Y}^E_{2,2} + \boldsymbol{Y}^E_{4,2}\right)$

в этом случае уже не удается сформировать вращательно-инвариантные величины, так как возникает «перемешивание» в коэффициентах разложения $a_{l,m}$ и $a_{l\pm1,m}$ и они будут связаны.

Векторные гармоники обеспечивают вращательную инвариантность величин, аналогичных (3):

$$\boldsymbol{Y}_{\pm l,m}(\theta,\phi) = (\boldsymbol{e}_\phi \mp i\boldsymbol{e}_\theta)\frac{i^{m+1}}{\sqrt{2l(l+1)}} \times \\ \times \left(\frac{\partial Y_{l,m}(\theta,\phi)}{\partial\theta} \pm \frac{m}{\sin\theta} Y_{l,m}(\theta,\phi)\right), \tag{4a}$$

$$A_{\pm l,m} = \oint (\boldsymbol{M}, \boldsymbol{Y}_{\pm l,m})\, d\Omega, \tag{4b}$$

$$\boldsymbol{M}(\theta,\phi) = \sum_{l=1}^{\infty}\sum_{m=-l}^{l} (A_{+l,m}\boldsymbol{Y}_{+l,m} + A_{-l,m}\boldsymbol{Y}_{-l,m}). \tag{4c}$$

Один из вариантов векторного базиса на сфере приведен выражением (4a). В (4b) показано, как получаются коэффициенты разложения, интеграл берется по всей сфере, а $\boldsymbol{M}(\theta,\phi)$ — интересующее поле, в данном случае это поле видимых скоростей квазаров. Из выражения (4c) видно, как можно восстановить поле $\boldsymbol{M}$, суммирование по l ведется с 1, а не с 0, так как гармоники векторные, и $\boldsymbol{Y}_{\pm l,m}$ при $l=0$ перестает иметь смысл. Если бы возникла необходимость разложить тензорное поле второго порядка на сфере, то не имели бы смысл соответствующие базисные гармоники с $l=0$ и $l=1$.

Базис (4a) не общепринятый, но с помощью него просто перейти к тому, который используется значительно чаще. Он был выписан ввиду фундаментальности [14]. Однако в физических задачах чаще используется представление в виде электрической E и магнитной M мод векторного поля. Переход к ним осуществляется линейным преобразованием:

$$\boldsymbol{Y}^E_{l,m}(\theta,\phi)=\frac{\boldsymbol{Y}_{+l,m}-\boldsymbol{Y}_{-l,m}}{\sqrt{2}},\quad \boldsymbol{Y}^M_{l,m}(\theta,\phi)=i\frac{\boldsymbol{Y}_{+l,m}+\boldsymbol{Y}_{-l,m}}{\sqrt{2}},$$

$$A^E_{l,m}=\frac{A_{+l,m}-A_{-l,m}}{\sqrt{2}},\quad A^M_{l,m}=i\frac{A_{+l,m}+A_{-l,m}}{\sqrt{2}}, \tag{5}$$

$$\boldsymbol{M}(\theta,\phi)=\sum_{l=1}^{\infty}\sum_{m=-l}^{l}(A^E_{l,m}\boldsymbol{Y}^E_{l,m}+A^M_{l,m}\boldsymbol{Y}^M_{l,m}), \tag{6}$$

$$C^E_l=\frac{1}{2l+1}\sum_{m=-l}^{l}|A^E_{l,m}|^2. \tag{7}$$

Выражение (7) имеет вид в точности как (3), для $l=1$ в нем есть составляющая, пропорциональная ускорению системы отсчета, в которой произведены наблюдения скоростей источников. В случае M-моды формула такая же, C^M_1 характеризует вращение системы отсчета.

Проблема общего выражения (6) в том, что поле скоростей $\boldsymbol{M}(\theta,\phi)$ при произвольных коэффициентах $A^{E,M}_{l,m}$ будет комплекснозначным, именно по этому для визуализации суммы двух гармоник на рис. 6 пришлось взять действительную часть выражения (впрочем, можно было бы обойтись и мнимой). Физического смысла в этом нет, поэтому нужно наложить на выражение (6) условия действительно-значности для любых θ и ϕ. Это в свою очередь влечет за собой определенную симметрию коэффициентов $A^{E,M}_{l,m}=a^{E,M}_{l,m}+ib^{E,M}_{l,m}$. Точный вид симметрии был найден ниже. Выражения были проверены на правильность символьно для всех $l<10$ и в отдельных случаях численно. Их полный вид приведен ниже, стрелками обозначены замены выражений слева на выражения справа. Так или иначе происходит избавление от коэффициентов с отрицательными m:

$$a^E_{l,m}\to\begin{cases}-a^E_{l,-m}, & \text{если } m<0\wedge m\equiv 1(\mathrm{mod}\,2),\\ a^E_{l,-m}, & \text{если } m<0\wedge m\equiv 0(\mathrm{mod}\,2),\end{cases}$$

$$a^M_{l,m}\to\begin{cases}-a^M_{l,-m}, & \text{если } m<0\wedge m\equiv 1(\mathrm{mod}\,2),\\ a^M_{l,-m}, & \text{если } m<0\wedge m\equiv 0(\mathrm{mod}\,2),\end{cases}$$

$$b^E_{l,m}\to\begin{cases}b^E_{l,-m}, & \text{если } m<0\wedge m\equiv 1(\mathrm{mod}\,2),\\ -b^E_{l,-m}, & \text{если } m<0\wedge m\equiv 0(\mathrm{mod}\,2),\\ 0, & \text{если } m=0,\end{cases} \tag{8}$$

$$b^M_{l,m}\to\begin{cases}b^M_{l,-m}, & \text{если } m<0\wedge m\equiv 1(\mathrm{mod}\,2),\\ -b^M_{l,-m}, & \text{если } m<0\wedge m\equiv 0(\mathrm{mod}\,2),\\ 0, & \text{если } m=0.\end{cases}$$

В качестве примера приведем выражения для $M(\theta,\phi)$ в раскрытом виде, до наложения условия действительности значений и после этого, ограничивая главное мультипольное число l единицей, т. е. суммируя в (6) по l не до ∞, а до 1.

$$\begin{aligned}\boldsymbol{M}_{l_{\max}=1}(\theta,\phi)&=\sum_{l=1}^{1}\sum_{m=-l}^{l}\left(A^E_{l,m}\boldsymbol{Y}^E_{l,m}+A^M_{l,m}\boldsymbol{Y}^M_{l,m}\right)=\\ &=\boldsymbol{e}_\theta\Bigg((-1)\frac{1}{4}e^{-i\phi}\sqrt{\frac{3}{\pi}}\Bigg(\Big(i\cos\theta A^E_{1,-1}+A^M_{1,-1}+\\ &\quad+\sqrt{2}\,e^{i\phi}\sin\theta A^E_{1,0}-e^{2i\phi}\left(-i\cos\theta A^E_{1,1}+A^M_{1,1}\right)\Big)\Bigg)\Bigg)+\\ &+\boldsymbol{e}_\phi\Bigg(\frac{1}{4}e^{-i\phi}\sqrt{\frac{3}{\pi}}\Big(-A^E_{1,-1}+i\cos\theta A^M_{1,-1}+\\ &\quad+\sqrt{2}\,e^{i\phi}\sin\theta A^M_{1,0}+e^{2i\phi}\left(A^E_{1,1}+i\cos\theta A^M_{1,1}\right)\Big)\Bigg),\end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{M}^{\mathrm{Real}}_{l_{\max}=1}(\theta,\phi)&=\boldsymbol{e}_\theta\Bigg(-\frac{1}{4}\sqrt{\frac{3}{\pi}}\Big(\sqrt{2}\sin\theta\, a^E_{1,0}-\\ &\quad-2\Big(\cos\theta\sin\phi\, a^E_{1,1}+\cos\phi\, a^M_{1,1}+\\ &\quad+\cos\theta\cos\phi\, b^E_{1,1}-\sin\phi\, b^M_{1,1}\Big)\Big)\Bigg)+\\ &+\vec{e}_\phi\Bigg(\frac{1}{4}\sqrt{\frac{3}{\pi}}+\Big(a^M_{1,0}\sqrt{2}\sin\theta+a^E_{1,1}2\cos\phi-\\ &\quad-a^M_{1,1}\,2\cos\theta\sin\phi+b^E_{1,1}\,2\sin\phi+b^M_{1,1}\cos\theta\cos\phi\Big)\Bigg).\end{aligned} \tag{10}$$

Выражение (9) — до упрощения, (10) — после упрощения, при котором используются правила (8). Число свободных действительных коэффициентов после упрощения уменьшилось в два раза, $A^E_{1,1}=a^E_{1,1}+ib^E_{1,1}$ считается за два коэффициента.

Можно найти соответствие между коэффициентами в (10) и формулой для изменения вековой аберрации (2). Приведем ее еще раз для наглядности, считая что в качестве сферической системы координат выбрана галактическая, и $l=\phi$, $b=\pi/2-\theta$,

$$\begin{aligned}\mu&=\boldsymbol{e}_\phi(A_y\cos\phi-A_x\sin\phi)/c+\\ &+\boldsymbol{e}_\theta(A_x\cos\theta\cos\phi+A_y\cos\theta\sin\phi-A_z\sin\theta)/c.\end{aligned} \tag{11}$$

Соотношение между коэффициентами в (10) и (11) примет вид

$$A_x = c\sqrt{\frac{3}{4\pi}}\, b^E_{1,1}, \quad A_y = c\sqrt{\frac{3}{4\pi}}\, a^E_{1,1}, \quad A_z = c\sqrt{\frac{3}{8\pi}}\, a^E_{1,0}. \tag{12}$$

Выражение (12) дает соответствие между моделью изменения вековой аберрации и моделью векторных сферических гармоник. Обнулив в (10) все, кроме $b^E_{1,1}$, $a^E_{1,1}$, $a^E_{1,0}$, и используя (12), можно перевести (10) в (11).

Наличие более широкой модели, как правило, только плюс, ибо появляется пространство для некоторого выбора, сравнения, анализа. В текущей работе это важно потому, что экспериментальные данные для анализа очень зашумленные и значимый сигнал извлечь оттуда сложно, поэтому нужно иметь некоторое поле для численных экспериментов. Выражение (6) после упрощения согласно правилам (8) при фиксированном натуральном $l_{\max} = n$ будем называть «моделью 2 при $l_{\max} = n$».

3. Нахождение параметров моделей по каталогам

В предыдущей главе были описаны два модели для обработки экспериментальных данных по видимым движениям радиоисточников. Модель изменения вековой аберрации статична и в каком-то смысле нерасширяема, в ней 3 параметра (или 6) для поиска (компоненты ускорения наблюдателя). Модель же мультипольного разложения может быть сильно расширена в зависимости от точности экспериментальных данных, число независимых коэффициентов в ней $n = 2(l^2_{\max} + 2l_{\max})$ — переменное и зависит от того, до какого максимального мультипольного числа $l_{\max}$ производится суммирование в формуле (6).

Обе модели линейны по неизвестным параметрам. Для их нахождения берется один каталог с n объектами, составляется переопределенная взвешенная система из $2n$ уравнений, весами выступают обратные квадраты абсолютных ошибок компоненты скорости из каталога. Уравнений $2n$, потому что существуют две ненулевые компоненты видимой скорости. Методом наименьших квадратов определяются неизвестные коэффициенты a и b. Схематичный вид переопределенной системы уравнений приведен ниже (вид для «модели 2 при $l_{\max} = 1$»), столбец ω_i — веса уравнений, $\mu^{\alpha,\delta}_i$ — компоненты скорости i-го квазара, $\{\theta_i, \phi_i\}$ — его координаты в сферической СК, которая связана с СК каталога простым образом $\theta_i = \pi/2 - \delta_i$, $\phi_i = \alpha_i$:

$$\begin{aligned}
&M^{l_{\max}=1}_{\alpha}\left(a^E_{1,0}, a^E_{1,1}, a^M_{1,0}, a^M_{1,1}, b^E_{1,1}, b^M_{1,1}, \{\theta_1, \phi_1\}\right) = \mu^{\alpha}_1,\\
&\qquad \omega^{\alpha}_1 = 1/(\delta\mu^{\alpha}_1)^2,\\
&M^{l_{\max}=1}_{\alpha}\left(a^E_{1,0}, a^E_{1,1}, a^M_{1,0}, a^M_{1,1}, b^E_{1,1}, b^M_{1,1}, \{\theta_2, \phi_2\}\right) = \mu^{\alpha}_2,\\
&\qquad \omega^{\alpha}_2,\\
&\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\\
&M^{l_{\max}=1}_{\alpha}\left(a^E_{1,0}, a^E_{1,1}, a^M_{1,0}, a^M_{1,1}, b^E_{1,1}, b^M_{1,1}, \{\theta_n, \phi_n\}\right) = \mu^{\alpha}_n,\\
&\qquad \omega^{\alpha}_n,\\
\hline
&M^{l_{\max}=1}_{\delta}\left(a^E_{1,0}, a^E_{1,1}, a^M_{1,0}, a^M_{1,1}, b^E_{1,1}, b^M_{1,1}, \{\theta_1, \phi_1\}\right) = \mu^{\delta}_1,\\
&\qquad \omega^{\delta}_1,\\
&\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\\
&M^{l_{\max}=1}_{\delta}\left(a^E_{1,0}, a^E_{1,1}, a^M_{1,0}, a^M_{1,1}, b^E_{1,1}, b^M_{1,1}, \{\theta_n, \phi_n\}\right) = \mu^{\delta}_n,\\
&\qquad \omega^{\delta}_n.
\end{aligned} \tag{13}$$

Явный вид выражений для $M^{l_{\max}=1}_{\alpha,\delta}$ мы не приводим ввиду их громоздкости и отсутствия в них информативного смысла. В явном виде он приведен в (10).

Хотя МНК дает ошибки определения неизвестных, лучше определить ошибки иным способом, ввиду того, что характерная точность данных очень низкая: относительная ошибка скорости порядка 0.5. При столь высоких относительных ошибках корректнее воспользоваться методом Монте-Карло для оценки того, в каком диапазоне лежит каждый из параметров с заранее заданной вероятностью (например, 67%, что в случае нормального распределения соответствует допуску 1σ). Так можно указать несимметричный диапазон, в котором лежит величина (например, $a = 1.5^{+1}_{-0.5}$). Приведем поясняющий пример, пусть есть уравнение с одним неизвестным $f(x) = v_0$, v_0 задан с погрешностью δv и нужно найти диапазон, в котором лежит неизвестная x. Можно найти x для каждого v из диапазона $(v_0 - \delta v, v_0 + \delta v)$ и построить распределение величины x, а из этой информации можно посчитать квантили распределения и точно (в каком-то смысле) указать, что $x_0 \in (x_0 - \delta x_1, x_0 + \delta x_2)$ с вероятностью 67%, или 95%, или с любой другой.

При моделировании менялся вектор μ (столбец свободных параметров) выбором случайного числа для j-компоненты из равномерного распределения $[\mu_j - \delta\mu_j, \mu_j + \delta\mu_j]$ и для каждого случая находился ответ. Проделав эту операцию несколько тысяч раз, можно указать границы, в которых лежат параметры с заданной вероятностью.

4. Результаты

В табл. 3 приведены основные результаты работы: компоненты ускорения наблюдателя. В статье [8] также указаны параметры модели 1 (при использовании каталога T1). Результаты в данной работе согласуются с результатами в приведенной статье (см. также [12]). Стоит обратить внимание, что в таблице погрешности указаны так, чтобы истинное значение параметра лежало в заданном диапазоне с вероятностью 67%.

Рисунок 7 наглядно показывает направление вектора ускорения для разных каталогов и параметров модели 2, а также разброс направлений. Абсолютные величины ускорения приведены в таблице. Стрелками показан переход от обработки по модели 2 с $l_{\max} = 1$ к $l_{\max} = 4$, чем светлее цвет, тем

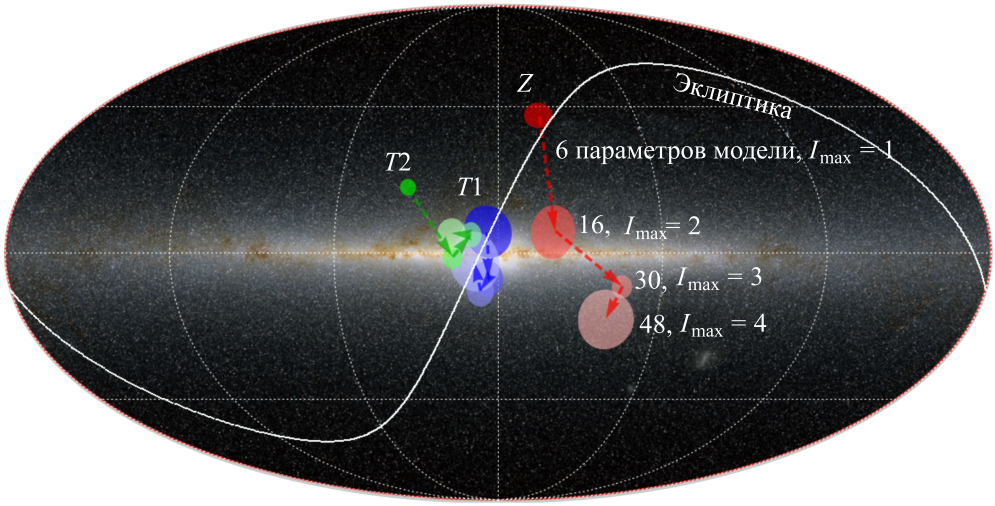

Рис. 7. Направление вектора ускорения, для разных каталогов, результаты по модели 2. Разными буквами отмечены результаты разных каталогов. Стрелками показано увеличение числа параметров в модели обработки (6, 16, 30, 48). $l_{max} = 1$–4. Чем светлее оттенок, тем больше параметров

Таблица 3

Компоненты ускорения, в единицах $4.61 \cdot 10^{-11}$ м/с^2, диапазон ошибок эквивалентен 1σ. Ускорение в физических единицах $4.61 \cdot 10^{-11}$ м/с^2 соответствует видимой скорости 1 мкс дуги/год

	T1	T2	Z
Модель 1			
A_x	$-1.02^{+0.38}_{-0.46}$	$1.05^{+0.24}_{-0.235}$	$-4.44^{+0.24}_{-0.22}$
A_y	$-6.78^{+0.46}_{-0.46}$	$-15.3^{+0.3}_{-0.2}$	$-2.7^{+0.24}_{-0.22}$
A_z	$-2.37^{+0.62}_{-0.55}$	$2.86^{+0.38}_{-0.37}$	$-1.74^{+0.31}_{-0.28}$
$\lvert\boldsymbol{A}\rvert$	$7.29^{+0.47}_{-0.5}$	$15.6^{+0.2}_{-0.2}$	$5.48^{+0.23}_{-0.23}$
Модель 2, $l_{max} = 1$			
A_x	$-0.76^{+0.44}_{-0.48}$	$-1.14^{+0.31}_{-0.32}$	$-5.5^{+0.32}_{-0.29}$
A_y	$-5.95^{+0.54}_{-0.48}$	$-16.1^{+0.4}_{-0.3}$	$-4.89^{+0.34}_{-0.33}$
A_z	$-2.46^{+0.58}_{-0.62}$	$2.75^{+0.35}_{-0.41}$	$-1.55^{+0.28}_{-0.31}$
$\lvert\boldsymbol{A}\rvert$	$6.52^{+0.51}_{-0.53}$	$16.3^{+0.3}_{-0.3}$	$7.52^{+0.31}_{-0.32}$
Модель 2, $l_{max} = 2$			
A_x	$0.7^{+0.32}_{-0.32}$	$1.33^{+0.28}_{-0.27}$	$-1.12^{+0.32}_{-0.31}$
A_y	$-6.23^{+0.32}_{-0.32}$	$-12.0^{+0.3}_{-0.3}$	$-2.43^{+0.3}_{-0.33}$
A_z	$-3.52^{+0.35}_{-0.35}$	$-3.26^{+0.3}_{-0.29}$	$-2.37^{+0.25}_{-0.23}$
$\lvert\boldsymbol{A}\rvert$	$7.2^{+0.33}_{-0.35}$	$12.5^{+0.3}_{-0.3}$	$3.59^{+0.3}_{-0.27}$
Модель 2, $l_{max} = 3$			
A_x	$1.18^{+0.34}_{-0.35}$	$-0.69^{+0.32}_{-0.33}$	$-2.28^{+0.34}_{-0.37}$
A_y	$-5.95^{+0.34}_{-0.33}$	$-13.1^{+0.3}_{-0.4}$	$-2.46^{+0.39}_{-0.39}$
A_z	$-3.29^{+0.36}_{-0.37}$	$-4.23^{+0.32}_{-0.36}$	$-9.23^{+0.3}_{-0.3}$
$\lvert\boldsymbol{A}\rvert$	$6.93^{+0.33}_{-0.34}$	$13.8^{+0.4}_{-0.3}$	$9.84^{+0.26}_{-0.31}$

больше l_{max}. Из рисунка видно, что только у каталога T1 все направления вектора ускорения близки к центру Галактики и близки по разным моделям обработки. У остальных каталогов относительно большой разброс направления, как и абсолютной величины ускорения.

Заключение

В данной работе была исследован вопрос о природе видимых движений радиоисточников, образующих систему координат ICRS. Была высказана гипотеза, которая в некоторой мере могла объяснить наблюдаемые данные, а именно что движение квазаров мнимое (видимое только наблюдателю) и вызвано дрейфом вековой аберрации.

При использовании разных вариантов обработки наблюдательных данных были найдены параметры ускорения наблюдателя (барицентра Солнечной системы), которые наилучшим образом обеспечивали бы наблюдаемое поле скоростей на небесной сфере.

Полученные результаты модуля ускорения по каталогу T1 в модели 1 $(3.36 \pm 0.23) \cdot 10^{-10}$ м/с^2 явно больше, чем ускорение, требуемое по теоретическим оценкам $(1.94 \pm 0.2) \cdot 10^{-10}$ м/с^2. Ошибки соответствуют 1σ. Однако ускорение, полученное по модели 2 при $l_{max} = 2$, в пределах погрешности лежит в границах соответствующего центростремительного ускорения барицентра Солнечной системы, полученного из теоретических соображений.

Исходные каталоги скоростей радиоисточников были приведены к одному виду и проанализированы. Разработано программное обеспечение для работы с данными численных расчетов и визуализации результатов.

Показано, что текущие накопленные данные РСДБ-наблюдений достаточно полны и точны для того, чтобы обнаружить дрейф вековой аберрации из-за изменения вектора скорости барицентра Солнечной системы относительно Галактики. Хотя большинство полученных результатов дают большее зна-

чение ускорения, чем требуют теоретические оценки, пока еще несколько рано говорить о существенном расхождении наблюдений и теоретических предсказаний, необходимы более точные наблюдения. В будущих реализациях небесной системы отсчета нужно будет корректировать положение источника в связи с этим эффектом.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 13-02-00184).

Список литературы

1. *Ma C., Arias E.F.* // Astron. J. 1998. **116**. P. 516.
2. *Жаров В.Е.* Сферическая астрономия. Фрязино, 2002.
3. *Ковалевский Ж.* Современная астрометрия. Фрязино, 2004.
4. *Blair D.G., Sazhin M.V.* // Astron. Astrophys. Trans. 1993. **3**. P. 191.
5. *Gwinn C.R., Eubanks T.M., Pyne T.* // Astron. J. 1997. **485**. P. 87.
6. *Сажин М.В., Сажина О.С., Пширков М.С.* // Астрон. журн. 2011. **88**. С. 1036.
7. *Захаров А.Ф.* // Астрон. журн. 2015. **92**. С. 699. (*Zakharov A.F.* // Astron. Rep. 2015. **59**. P. 823.)
8. *Titov O., Lambert S. B., Gontier A.-M.* // Astron. Astrophys. 2011. **529**. P. A91.
9. *Сажин М.В., Сиверский М. Н., Калинина Т.А., Шмелева Н.В.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2013. № 2. С. 66. (*Sazhin M.V., Siversky M.N., Kalinina T.A., Shmeleva N.V.* // Moscow University Phys. Bull. **68**, N 2. P. 159.)
10. *Titov O.* // Journées Systèmes de Référence Spatio-temporels / Ed. by N. Capitaine. 2007; 2008. P. 16.
11. *Воронков Н.А., Жаров В.Е.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2013. № 3. С. 58. (*Voronkov N.A., Zharov V.E.* // Moscow University Phys. Bull. **68**, N 3. P. 235.)
12. *Titov O.* // Measuring the Future: Proceedings of the Fifth IVS / Ed. by A. Finkelstein, D. Behrend. 2008. P. 265.
13. *Kopeikin S.M., Makarov V.V.* // Astron. J. 2006. **131**. P. 1471.
14. *Шапиро З.Я., Гельфанд И.М., Минлос Р.А.* Представления группы вращений и группы Лоренца, их применения. М., 1958.

A multipole analysis of the apparent motion of reference radio sources

M. V. Sazhin[1,a], **O. S. Sazhina**[1], **V. N. Sementsov**[1,b], **M. N. Siversky**[2], **V. E. Zharov**[2], **K. V. Kuimov**[1]

[1] *Sternberg State Institute of Astronomy, Moscow State University, Moscow 119191, Russia.*
[2] *Department of Celestial Mechanics, Astrometry and Gravimetry, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.*
E-mail: [a] *moimaitre@mail.ru,* [b] *valera@sai.msu.ru.*

In this paper, the apparent motions of quasars, which are the reference sources of the international celestial reference system (ICRS), are analyzed. Kinematic parameters from four catalogs compiled by different research groups are used. Apparent motions are expanded on a special set of vector functions on the sphere that are an irreducible representation of the rotation group $O(3)$. The degree of the noninertiality of the barycentric reference system caused by the rotation of the solar system around the galactic center is estimated according to expansion coefficients. The direction and magnitude of the acceleration vector are calculated and compared with the alternative estimates. This method is discussed as a way to test Newton's law on a large scale.

Keywords: celestial reference system, galaxy rotation, relativistic aberration.
PACS: 98.35.Df, 98.54.–h, 95.80.+p.
Received 19 December 2015.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2016. **71**, No. 3. Pp. 309–316.

Сведения об авторах

1. Сажин Михаил Васильевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-50-06, e-mail: moimaitre@mail.ru.
2. Сажина Ольга Сергеевна — доктор физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-50-06, e-mail: tedeshka@mail.ru.
3. Семенцов Валериан Никитич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-19-70, e-mail: valera@sai.msu.ru.
4. Сиверский Михаил Николаевич — выпускник 2014 г.
5. Жаров Владимир Евгеньевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой; тел.: (495) 939-37-64, e-mail: vladzh2007@yandex.ru.
6. Куимов Константин Владиславович — доктор физ.-мат. наук, зав. отделом астрометрии; тел.: (495) 939-37-64, e-mail: kvk@sai.msu.ru.