



К определению постоянной Галактической аберрации

З.М. Малкин

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН

Аннотация

Галактическая аберрация в собственных движениях (ГА) имеет амплитуду (также известную как постоянная галактической аберрации) около 5 мксд/год, что существенно для современных высокоточных астрометрических наблюдений, таких как *Gaia* и радиоастрометрия. Существует несколько определений значения постоянной ГА, но они не очень хорошо согласуются между собой. Оценки, полученные на основе радиоастрометрических (РСДБ) и *Gaia* наблюдений, существенно различаются, поэтому было бы очень желательно использовать другой независимый метод для решения проблемы несоответствия между этими двумя методами. В данной работе производится определение постоянной ГА по параметрам вращения Галактики, определяемым методами галактической астрономии. Полученный результат показал, что оценка постоянной ГА, вычисленная по данным галактической астрономии, согласуется в пределах погрешности с оценкой, полученной по данным *Gaia*, и плохо согласуется с оценкой, основанной на РСДБ-наблюдениях внегалактических радиоисточников.

Введение

Ошибки координат в наиболее точных современных каталогах положений небесных источников, таких как ICRF (International Celestial Reference Frame) в радиодиапазоне и *Gaia* в оптике, находится на уровне 10 мксд (микросекунд дуги). На таком уровне ошибок даже весьма тонкие эффекты могут повлиять на положения источников, полученные по данным радио- и оптических наблюдений. Одним из таких эффектов является галактическая аберрация в собственных движениях (ГА), вызванная центростремительным ускорением Солнечной системы (точнее, локального стандарта покоя – ЛСП), направленным к центру Галактики (Kovalevsky, 2003; Kopeikin и Макагов, 2006; Zinovy Malkin, 2014). Влияние ГА на координаты источников может также проявляться в результатах определения взаимной ориентации между реализациями небесной системы координат и параметров вращения Земли (Titov, 2010; Z. M. Malkin, 2011; J. -. Liu, Capitaine и др., 2012; J.-с. Liu и N. Liu, 2020; Yao и др., 2022).

Влияние ГА на видимое движение источника зависит от координат источника и имеет максимум амплитуды примерно 5 мксд/год. Эту величину, зависящую от расстояния ЛСП до центра Галактики и скорости его кругового вращения вокруг центра Галактики, можно назвать постоянной ГА, далее обозначаемой как A (см. раздел 1 для более точного определения этой величины).

Обсуждение методов определения величины A приведено в Zinovy Malkin (2014) и MacMillan и др. (2019). В этих статьях показано существенное расхождение между значением, полученным по данным радиоастрометрии $A = 5.8 \pm 0.3$ мксд/год и по параметрам вращения Галактики, полученным методами галактической астрономии, $A = 5.0 \pm 0.3$ мксд/год. Опубликованная недавно оценка постоянной ГА по наблюдениям *Gaia* оказалась равной $A = 5.05 \pm 0.35$ мксд/год (Gaia Collaboration и др., 2021), что существенно ближе к значению, полученному из галактической астрономии.

В данной статье оценка, полученная по параметрам вращения Галактики, была пересмотрена с использованием несколько иного подхода, чем использованного в предыдущих работах. Если

раньше для определения A использовались вычисленные отдельно средние значения галактоцентрического расстояния ЛСП и средние значения скорости вращения Галактики, полученные по данным, найденным в литературе, то в настоящей работе использованы только результаты одновременного определения этих параметров в рамках одной и той же публикации.

1 Моделирование ГА

Влияние ГА на видимые движения объектов на небесной сфере описывается по-разному для внегалактических источников и звезд нашей Галактики (Kovalevsky, 2003; J. .- Liu, Xie и Zhu, 2013). В данной работе рассматривается только первый случай, который имеет непосредственное отношение к реализациям небесной опорной системы координат в радио (РСДБ) и оптике (*Gaia*) поскольку они основаны на наблюдениях удаленных галактик и их активных ядер.

Видимое собственное движение внегалактических источников, вызванное ГА, определяется как (Kovalevsky, 2003; Kopeikin и Makarov, 2006):

$$\begin{aligned}\mu_l \cos b &= -A \sin l, \\ \mu_b &= -A \cos l \sin b,\end{aligned}\quad (1)$$

где l и b – Галактическая долгота и широта источника, соответственно.

Постоянная ГА A зависит от параметров вращения Галактики как (Zinovy Malkin, 2014; Z. M. Malkin, 2011)

$$A = \frac{V_0 \Omega_0}{c} = \frac{R_0 \Omega_0^2}{c} = \frac{V_0^2}{R_0 c}, \quad (2)$$

где R_0 – галактоцентрическое расстояние ЛСП, V_0 и Ω_0 – линейная и угловая скорости кругового вращения ЛСП вокруг центра Галактики, соответственно, c – скорость света.

Распределение величин и направлений скоростей движений источников по небесной сфере, обусловленных ГА, показано на Рис. 1. Движения направлены от Галактического антицентра ($l=180^\circ$, $b=0^\circ$; $\alpha=86.4^\circ$, $\delta=-29.0^\circ$) к центру Галактики ($l=0^\circ$, $b=0^\circ$; $\alpha=266.4^\circ$, $\delta=-29.0^\circ$). Скорости равны нулю в центре и антицентре Галактики и максимальны (равны A) на галактических меридианах $l=90^\circ$ и $l=270^\circ$.

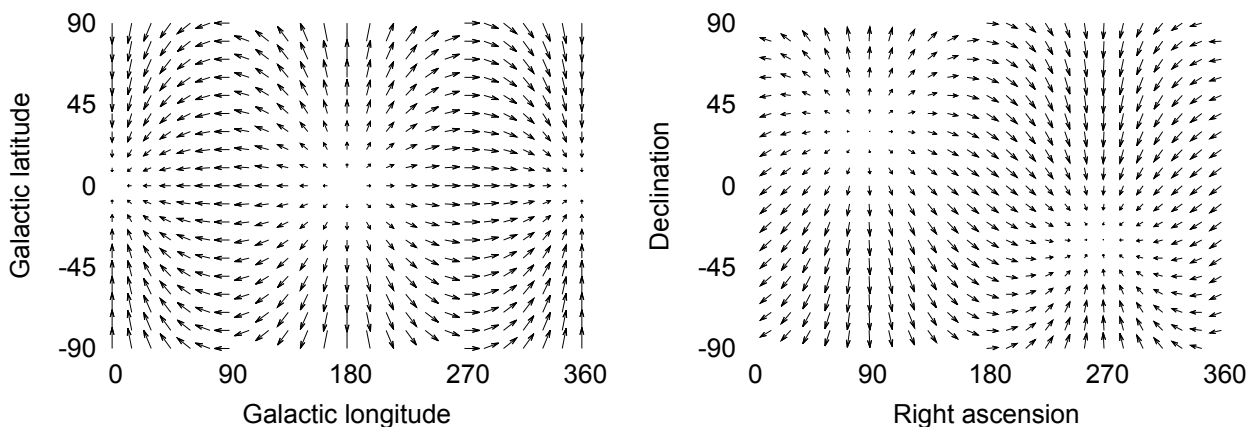


Рис. 1: Собственные движения, обусловленные ГА, в галактической и экваториальной системах координат. Стрелки максимальной длины соответствуют величине постоянной ГА, равной 5 мксд/год.

2 Постоянная ГА по данным галактической астрономии

Для получения оценки постоянной ГА A по данным галактической астрономии можно применить две стратегии. Во-первых, можно оценить независимо R_0 , V_0 и Ω_0 по данным работ, в которых

эти значения определялись вместе или по отдельности. Подобный подход использовался в предыдущих статьях автора, таких как Zinovy Malkin (2014), Z. M. Malkin (2011) и Z. Malkin (2014), и дал среднее значение $A = 5.0 \pm 0.3$ мксд/год. Однако во многих случаях оценки параметров вращения Галактики не являются независимыми в оригинальных работах, использованных для вычисления A .

Чтобы сделать эту оценку более систематически независимой, в данном случае был применен другой подход с использованием только тех публикаций, в которых R_0 и скорость вращения Галактики V_0 и/или Ω_0 оценивалась одновременно. Результаты этих работ и вычисленные по ним величины A представлен в Табл. 1.

Таблица 1: Результаты определения постоянной ГА A по параметрам вращения Галактики.

Работа	R_0 [кпк]	V_0 [км/с]	Ω_0 [км/с/кпк]	A [мксд/год]
McMillan (2017) (a)	8.20 ± 0.09	232.8 ± 3.0		4.65 ± 0.13
McMillan (2017) (b)	7.97 ± 0.15	226.8 ± 4.2		4.54 ± 0.19
Rastorguev и др. (2017)	8.24 ± 0.12	236.5 ± 7.0		4.78 ± 0.29
Xu, Hou и Wu (2018)	8.35 ± 0.18	229.0 ± 12		4.42 ± 0.47
Reid, Menten и др. (2019)	8.15 ± 0.15	236.0 ± 7.0		4.81 ± 0.30
VERA Collaboration и др. (2020)	7.92 ± 0.34		28.83 ± 0.85	4.63 ± 0.34
Bobylev, Krisanova и Bajkova (2020)	8.15 ± 0.12	236.4 ± 4.4		4.82 ± 0.19
Bobylev, Bajkova и др. (2021)	8.27 ± 0.10	240.0 ± 3.0		4.90 ± 0.14

Приведенные в таблице данные получены различными методами. McMillan (2017) получил две оценки параметров вращения Галактики для двух вариантов модели строения Галактики, полученных на основе сопоставления теоретических моделей и наблюдений мазеров и других кинематических данных. Результаты Rastorguev и др. (2017) получены из обработки измерений параллаксов, собственных движений и лучевых скоростей 136 мазеров методом статистических параллаксов. Результаты Xu, Hou и Wu (2018) базируются на РСДБ-наблюдениях параллаксов и собственных движений 102 мазеров и измеренных *Gaia* параллаксах 635 звезд класса O. В этой работе определялась скорость движения Солнца $\Theta_0 = 240 \pm 10$ км/с, которая была приведена к V_0 путем учета скорости движения Солнца относительно ЛСП $V_{\odot} = 10.7 \pm 6.0$ км/с из Reid, Menten и др. (2019). Результаты Reid, Menten и др. (2019) получены из обработки РСДБ-наблюдений параллаксов и собственных движений 147 мазеров. Результаты VERA Collaboration и др. (2020) получены из обработки РСДБ-наблюдений параллаксов и собственных движений 99 мазеров в рамках проекта VERA (VLBI Exploration of Radio Astrometry). Эти результаты также относятся к угловой скорости движения Солнца и также были приведены к ЛСП с использованием значения V_{\odot} км/с из Reid, Menten и др. (2019). Результаты Bobylev, Krisanova и Bajkova (2020) получены из совместной обработки РСДБ-определений параллаксов и собственных движений 256 радиосточников (мазеров и радиозвезд). Результаты Bobylev, Bajkova и др. (2021) получены из обработки данных о параллаксах, собственных движениях и лучевых скоростях 800 цефеид из каталога *Gaia* DR2 и другим данным.

Средневзвешенное значение оценок, приведенных в последнем столбце Табл. 1, было вычислено с использованием расширенной обработки ошибок с учетом как случайных ошибок отдельных определений, так и их разброса методом, предложенным в (Z. M. Malkin, 2013). В результате было найдено окончательное среднее значение $A = 4.73 \pm 0.09$ мксд/год.

3 Обсуждение и заключение

В данной работе получена новая оценка постоянной ГА $A = 4.7 \pm 0.1$ мксд/год по последним данным исследований параметров вращения Галактики. Эта оценка гораздо ближе к величине, полученной командой *Gaia* (Gaia Collaboration и др., 2021) $A = 5.05 \pm 0.35$ мксд/год, чем к оценке, основанной на геодезических данных РСДБ, $A = 5.8 \pm 0.3$ мксд/год. Это позволяет предполо-

жить, что геодезическая оценка A на основе РСДБ может давать завышенное значение A , тогда как оценка, полученная здесь, хорошо согласуется с предыдущими работами, где использовался подобный подход Zinovy Malkin (2014), Z. M. Malkin (2011) и Z. Malkin (2014) и с оценкой, полученной по данным *Gaia*.

Следует иметь в виду, что ошибка средневзвешенного значения постоянной ГА, полученная в настоящей работе, возможно, занижена, поскольку результаты определений параметров вращения Галактики, приведенные в Табл. 1 и использованные для вывода среднего значения, частично базируются на одних и тех же РСДБ-наблюдениях мазеров, а значит в какой-то степени коррелированы.

Надо отметить, что в данной работе рассмотрен только эффект от кругового движения, вызванный центростремительным ускорением к центру Галактики, без попытки уточнения положения этого центра на небесной сфере, которое принято по Vlaauw и др. (1960) (система Галактических координат, принятая МАС) и Reid и Brunthaler (2004): $\alpha = 266.42^\circ$, $\delta = -29.01^\circ$. Многие авторы, которые изучали проявление ГА в РСДБ-наблюдениях или наблюдениях *Gaia*, оценивали также и направление вектора ускорения. Обзор этих результатов, полученных по РСДБ-наблюдениям сделан в MacMillan и др. (2019). Всего приведено 10 результатов разных авторов, которые показывают большой разброс координат центра Галактики: $\alpha = (243 \dots 281)^\circ \pm (2 \dots 11)^\circ$, $\delta = (-11 \dots -35)^\circ \pm (3 \dots 12)^\circ$. Данные *Gaia* (Gaia Collaboration и др., 2021) дали $\alpha = 269.1^\circ \pm 5.4^\circ$, $\delta = -31.6^\circ \pm 4.1^\circ$. Сопоставление этих данных показывает, что все имеющиеся результаты практически совпадают в пределах ошибок их определения. Ввиду малости величины ГА такие различия не окажут заметного влияния на результат редукции наблюдений за этот эффект, как уже исследовалось в Zinovy Malkin (2014).

Автор благодарен анонимному рецензенту за полезные замечания и рекомендации по улучшению первоначальной версии статьи.

Список литературы

- Kovalevsky, J. (2003). *Aberration in proper motions*. A&A 404, с. 743–747.
- Kopeikin, Sergei M. и Valeri V. Makarov (2006). *Astrometric Effects of Secular Aberration*. AJ 131.3, с. 1471–1478.
- Malkin, Zinovy (2014). *On the implications of the Galactic aberration in proper motions for the Celestial Reference Frame*. MNRAS 445.1, с. 845–849.
- Titov, Oleg (2010). *Secular aberration drift and IAU definition of International Celestial Reference System*. MNRAS 407.1, с. L46–L48.
- Malkin, Z. M. (2011). *The influence of galactic aberration on precession parameters determined from VLBI observations*. Astronomy Reports 55.9, с. 810–815.
- Liu, J. -C., N. Capitaine, S. B. Lambert, Z. Malkin и Z. Zhu (2012). *Systematic effect of the Galactic aberration on the ICRS realization and the Earth orientation parameters*. A&A 548, A50.
- Liu, Jia-cheng и Niu Liu (2020). *The Galactic Aberration and Its Impact on Astronomical Reference Frames*. Chinese Astron. Astrophys. 44.2, с. 131–145.
- Yao, J. и др. (2022). *Effect of Galactic aberration on Earth orientation parameters: From the ICRF2 to the ICRF3*. A&A 665, A121.
- MacMillan, D. S. и др. (2019). *Galactocentric acceleration in VLBI analysis. Findings of IVS WG8*. A&A 630, A93.
- Gaia Collaboration и др. (2021). *Gaia Early Data Release 3. Acceleration of the Solar System from Gaia astrometry*. A&A 649, A9.
- Liu, J. -C., Y. Xie и Z. Zhu (2013). *Aberration in proper motions for stars in our Galaxy*. MNRAS 433.4, с. 3597–3604.
- Malkin, Z. (2014). *On the Galactic aberration constant*. В: Proc. Journées 2013 Systèmes de Référence Spatio-temporels. Под ред. Nicole Capitaine. Paris: Paris Observatory, France, с. 44–45.

- McMillan, Paul J. (2017). The mass distribution and gravitational potential of the Milky Way. *MNRAS* 465.1, с. 76–94.
- Rastorguev, A. S. и др. (2017). Galactic masers: Kinematics, spiral structure and the disk dynamic state. *Astrophysical Bulletin* 72.2, с. 122–140.
- Xu, Ye, Li-Gang Hou и Yuan-Wei Wu (2018). The spiral structure of the Milky Way. *Research in Astronomy and Astrophysics* 18.12, с. 146.
- Reid, M. J., K. M. Menten и др. (2019). Trigonometric Parallaxes of High-mass Star-forming Regions: Our View of the Milky Way. *ApJ* 885.2, с. 131.
- VERA Collaboration и др. (2020). The First VERA Astrometry Catalog. *PASJ* 72.4, с. 50.
- Bobylev, V. V., O. I. Krisanova и A. T. Bajkova (2020). Study of the Galactic Rotation Based on Masers and Radio Stars with VLBI Measurements of Their Parallaxes. *Astronomy Letters* 46.7, с. 439–448.
- Bobylev, V. V., A. T. Bajkova, A. S. Rastorguev и M. V. Zabolotskikh (2021). Analysis of galaxy kinematics based on Cepheids from the Gaia DR2 Catalogue. *MNRAS* 502.3, с. 4377–4391.
- Malkin, Z. M. (2013). On the calculation of mean-weighted value in astronomy. *Astronomy Reports* 57.11, с. 882–887.
- Blaauw, A., C. S. Gum, J. L. Pawsey и G. Westerhout (1960). The new I. A. U. system of galactic coordinates (1958 revision). *MNRAS* 121, с. 123.
- Reid, M. J. и A. Brunthaler (2004). The Proper Motion of Sagittarius A*. II. The Mass of Sagittarius A*. *ApJ* 616.2, с. 872–884.

On determination of the Galactic aberration constant

Z.M. Malkin

Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS

Abstract

Galactic aberration in proper motions (GA) has an amplitude (also known as the Galactic aberration constant) of about $5 \mu\text{as/yr}$, which is substantial for the modern highly accurate astrometric observations such as *Gaia* and radio astrometry. There are several determination of the GA constant, but they don't agree well. The estimates derived from radio astrometry (VLBI) and *Gaia* observations differ significantly, so it would be very desirable to involve another independent method to solve the problem of inconsistency between these two methods. In this paper, determination of the GA constant from the Galactic rotation parameters determined by methods of stellar astronomy is carried out. Obtained result showed that the GA constant estimate obtained from stellar astronomy agrees within errors with the estimate obtained from *Gaia* and does not agree well with the estimate based on VLBI observations of extragalactic radio sources.