

УДК 524.3—325.2

Исследование движения опорных звезд на галактических широтах $|b| > 45^\circ$

С. П. Рыбка

В 8-и площадках неба с галактиками ($|b| > 45^\circ$) из общей совокупности опорных звезд методом максимума правдоподобия выделены группы звезд с дисперсиями собственных движений, величины которых сравнимы с ошибками их определения. Показано, что использование таких звезд в качестве опорных систем позволяет снизить до $\pm 0.0015''$ в год величину космической ошибки в определяемых, на краю рабочего поля пластинок 400-мм астрографа обсерватории, относительных собственных движениях звезд.

INVESTIGATION OF THE PROPER MOTIONS OF REFERENCE STARS AT GALACTIC LATITUDES $|b| > 45^\circ$, by Rybka S. P.— The reference stars at high galactic latitudes with relatively small proper motions are recommended to be used for decreasing the cosmical error of stellar proper motions obtained with the Goloseevo long-focus astrograph.

С 1952 г. в ГАО АН УССР ведутся работы по определению собственных движений звезд относительно галактик. В настоящее время создано два предварительных каталога абсолютных собственных движений звезд [3, 7] и продолжается систематическое фотографирование вторых эпох площадок с галактиками на двойном длиннофокусном астрографе Обсерватории ($D=40$ см, $F=5.5$ м). Собственные движения звезд выводятся классическим методом шести постоянных, относительно группы слабых опорных звезд ($13^m—14^m$), обладающих движениями менее $0.05''$ в год.

Показано [5], что пекулярные движения опорных звезд на высоких галактических широтах могут оказывать значительное влияние на точность определяемых по пластинкам астрографа относительных собственных движений звезд. Соответствующая ошибка в собственных движениях звезд во многих работах называется «космической». Она зависит от дисперсии пекулярных движений опорных звезд и их количества [1]. «Космическую» ошибку можно уменьшить специальным подбором опорных звезд со сравнительно малыми собственными движениями. Однако при этом количество опорных звезд уменьшается, так что окончательная эффективность этой процедуры должна быть проверена в конкретных случаях. Решение этой проблемы и явилось целью данной работы.

Для наблюдения было выбрано 8 площадок с галактиками, галактическая широта которых $|b| > 45^\circ$. Сведения об исследуемых площадках приводятся в табл. 1. Относительные собственные движения звезд в этих площадках определены автором, используя классический метод шести постоянных. Опорными служили все звезды слабее 13^m , расположенные в пределах круга радиусом $30'$ и имеющие движения менее $0.05''$ в год. Простой отбор звезд с малыми движениями из количества таких звезд был затруднен тем обстоятельством, что на высоких галактических широтах общее распределение собственных движений звезд в узких интервалах звездных величин можно представить суммой двух распределений с существенно различными центрами [8]. При этом дисперсия движений одной из групп звезд значительно меньше дисперсии другой. Следовательно, группа звезд, обладающая меньшей дисперсией пекулярных движений могла бы служить опорной системой при определении относительных собственных движений звезд. Чтобы вычислить «космическую» ошибку в этом случае, необходимо оценить

среднее количество таких звезд в площадке и дисперсию их истинных движений.

Для выделения звезд с меньшей дисперсией собственных движений из общей совокупности опорных звезд использовали метод максимума правдоподобия, примененный Сандерсом [10], с целью отделения звезд — членов скоплений от звезд фона. Рассуждая аналогично, предполагаем, что на высоких галактических широтах общую функцию распределения собственных движений звезд в узких интервалах звездных величин можно представить в виде суммы двух эллипсоидальных нормальных функций с различными параметрами:

$$F(\mu_x, \mu_y) = F_1(\mu_x, \mu_y) + F_2(\mu_x, \mu_y). \quad (1)$$

Такое представление основывается на том, что с ростом галактической широты увеличивается процентное содержание карликов среди более слабых звезд. Таким образом, F_1 описывает распределение движений более далеких, а F_2 — более близких звезд.

Чтобы избавиться от возможной корреляции между μ_x и μ_y , собственные движения звезд переводят в такую систему координат (u, v) , где они независимы. Угол поворота (α) к этой системе координат находится из соотношения:

$$\operatorname{ctg} \alpha = -(\sigma_y^2 - \sigma_u^2) / \rho \sigma_x \sigma_y, \quad (2)$$

где ρ — коэффициент корреляции общего распределения собственных движений звезд, σ_x, σ_y — стандартные отклонения этого распределения в системе (x, y) , σ_u — стандартное отклонение в системе (u, v) .

Предварительно σ_u определяется из решения квадратного уравнения:

$$\begin{vmatrix} M_{11} - \lambda & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} - \lambda \end{vmatrix} = 0, \quad (3)$$

где M_{ij} — центральные моменты второго порядка общего распределения собственных движений звезд, а $\lambda_1^2 = \sigma_u^2, \lambda_2^2 = \sigma_v^2$. В новой системе координат уравнение (1) имеет вид:

$$F(\mu_u, \mu_v) = F_1(\mu_u, \mu_v) + F_2(\mu_u, \mu_v). \quad (4)$$

Так как μ_u и μ_v независимы в системе координат (u, v) , то каждая из двумерных функций F_1 или F_2 характеризуется только четырьмя параметрами $(\mu_{u1}, \mu_{v1}, \sigma_{u1}, \sigma_{v1})$ или $(\mu_{u2}, \mu_{v2}, \sigma_{u2}, \sigma_{v2})$. Оценки параметров этих функций и количество звезд одной из групп определяем итерацией из нелинейных уравнений, приравнивая к нулю частные производные ло-

Таблица 1. Сведения об исследуемых площадках

Номер области	Номер площадки	α (1950.0)	δ (1950.0)	l	b	Количество звезд слабее 13.0^m	Количество пар пластинок	Средняя разность эпох (в годах)
1	110	$13^h 27.7^m$	$+47^\circ 28'$	106°	$+66^\circ$	114	1	23.05
	113	13 51.3	$+40 32$	80	$+72$	92	1	22.13
2	116	14 03.0	$+55 08$	102	$+59$	76	2	17.92
	126	15 08.5	$+57 12$	93	$+51$	72	1	25.10
	129	15 38.6	$+59 29$	93	$+47$	90	2	16.45
3	153	23 17.8	$+ 8 00$	88	-48	86	2	19.54
	155	23 26.2	$+ 3 15$	86	-53	66	2	21.40
	156	23 41.7	$+10 05$	97	-49	64	2	19.54

гарифмической функции правдоподобия по неизвестным параметрам:

$$\frac{\partial \ln L(\vec{\mu}_u, \vec{\mu}_v; \vec{a})}{\partial a_j} = 0, \quad j = 1, 2, \dots, 9, \quad (5)$$

где $L(\vec{\mu}_u, \vec{\mu}_v, \vec{a})$ — функция правдоподобия, определяющаяся как $\prod_{i=1}^N F_i(\mu_u, \mu_v)$, а векторы

$$\begin{aligned} \vec{\mu}_u &\equiv (\mu_{u1}, \dots, \mu_{uN}); & \vec{\mu}_v &\equiv (\mu_{v1}, \dots, \mu_{vN}); \\ \vec{a} &\equiv (\bar{\mu}_{u1}, \bar{\mu}_{v1}, \bar{\mu}_{u2}, \bar{\mu}_{v2}, \sigma_{u1}, \sigma_{v1}, \sigma_{u2}, \sigma_{v2}, n_1) \end{aligned}$$

являются ее аргументами, N — количество всех звезд, n_1 — количество звезд одной из групп, например первой.

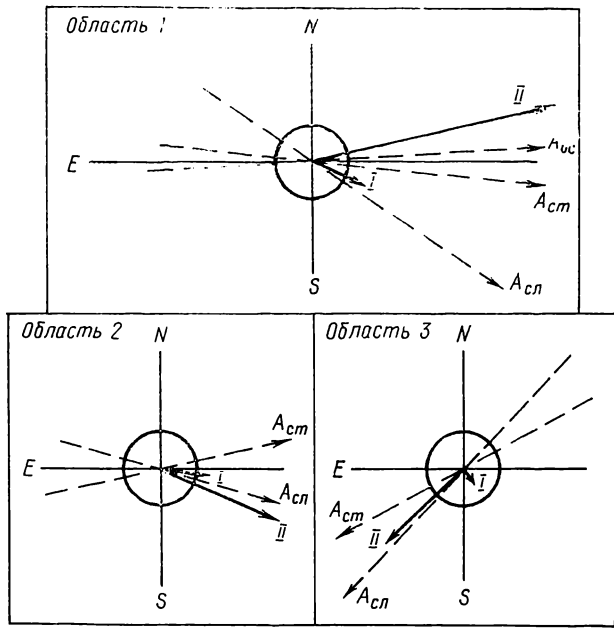
Чтобы повысить точность определения неизвестных параметров двух распределений изложенным методом, разделение звезд проводили не в отдельных площадках, а в более обширных областях, куда входили две или три площадки (табл. 1). Объединение площадок по областям происходило по следующим признакам: 1) одинаковая точность определения относительных собственных движений звезд, 2) близость поправок за параллактическое смещение опорных звезд и влияние галактического вращения (последние поправки оценивались по таблицам [2]). Практически различные суммы поправок в центре областей и отдельных площадках, входящих в данную область, не превышало $0.001'' - 0.002''$ в год. Это дало возможность объединить относительные собственные движения опорных звезд в каждой из областей. Совокупность опорных звезд трех областей была разделена методом максимума правдоподобия на две группы. Вычисления проводили на ЭВМ ЕС-1022 по программе, составленной сотрудницей Обсерватории Э. А. Герц. Так определены параметры (табл. 2) распределений относительных собственных движений двух групп звезд каждой области и площадки неба. Чтобы проверить правомочность ранее выполненного объединения площадок в области, сравнивали параметры распределений движений звезд отдельных площадок и параметры распределений областей в целом. Такое сравнение проводили отдельно для двух групп звезд. Для установления значимости расхождений средних значений применяли t -критерий, дисперсий — критерий Фишера. Так, при 1 %-м уровне значимости как для I группы звезд, так и для II группы параметры областей и отдельных площадок, входящих в данную об-

Таблица 2. Параметры распределений собственных движений двух групп звезд (в $0.0001''$ в год)

Номер области	Номер площадки	I группа звезд						II группа звезд					
		Количество	$\bar{\mu}_{x_1} \pm \varepsilon$	$\bar{\mu}_{y_1} \pm \varepsilon$	σ_{x_1}	σ_{y_1}	Количество	$\bar{\mu}_{x_2} \pm \varepsilon$	$\bar{\mu}_{y_2} \pm \varepsilon$	σ_{x_2}	σ_{y_2}		
1	110	79	$+60 \pm 10$	-26 ± 9	85	83	35	-132 ± 26	$+89 \pm 32$	152	188		
	113	56	$+65 \pm 10$	-16 ± 10	79	75	36	-87 ± 34	$+9 \pm 33$	204	200		
	Все	135	$+62 \pm 7$	-21 ± 7	82	79	71	-109 ± 21	$+48 \pm 23$	180	195		
2	116	42	$+39 \pm 12$	$+17 \pm 11$	76	70	34	-26 ± 36	-3 ± 26	207	153		
	126	30	$+46 \pm 13$	$+11 \pm 12$	74	69	42	-35 ± 30	-7 ± 32	195	208		
	129	40	$+51 \pm 12$	$+34 \pm 13$	79	73	50	-4 ± 29	-43 ± 30	189	198		
	Все	112	$+45 \pm 7$	$+21 \pm 7$	76	71	126	-21 ± 18	-19 ± 18	196	190		
3	153	32	-48 ± 12	$+27 \pm 12$	66	65	54	-5 ± 24	-17 ± 25	177	182		
	155	24	-26 ± 16	$+29 \pm 13$	77	64	42	$+36 \pm 27$	-20 ± 21	177	138		
	156	27	-49 ± 14	$+44 \pm 11$	75	59	37	$+84 \pm 25$	-16 ± 19	152	118		
	Все	83	-42 ± 8	$+33 \pm 7$	72	63	133	$+33 \pm 15$	-18 ± 13	170	152		

ласть, различаются только случайно. Это подтверждает возможность объединения относительных собственных движений опорных звезд близких по координатам площадок в одну совокупность. Кроме того, повышается точность определения редуций абсолютизации, вычисленных как среднее собственное движение всех галактик области с противоположным знаком. Найденные таким образом редуции абсолюти-

Направление движения I и II группы звезд в трех областях неба. (N—направление на северный полюс экваториальной системы координат — положительное направление оси склонений; E—направление на восток — положительное направление оси прямых восхождений; масштаб собственных движений звезд — в 1 см 0.003'' в год). Пунктирными линиями обозначены направления на известные антиапексы движения Солнца: I — стандартный антиапекс (Аст), 2 — антиапекс основного движения (Аос), 3 — антиапекс движения относительно слабых звезд 14^m по данным [6] и [9] (Асл)



зации вместе с ошибками их определения, а также количество галактик в каждой из областей приведены в табл. 3. Средняя точность определения редуций составляет $\pm 0.003''$ в год, что в 1.9 раза лучше их определения по отдельным площадкам [3].

Таблица 3. Редуции абсолютизации в трех областях неба (в 0.0001'' в год)

Номер области	Количество галактик	Редуция	
		по x	по y
1	16	-104 ± 28	$+2 \pm 30$
2	8	-77 ± 32	$+23 \pm 38$
3	11	$+35 \pm 38$	-42 ± 32

Затем средние относительные движения звезд I и II группы (табл. 2) были переведены в абсолютные при помощи редуций (табл. 3). На их основании вычисляли величину и направление полного абсолютного движения I и II групп звезд каждой области неба:

$$\bar{\mu} = \sqrt{\bar{\mu}_x^2 + \bar{\mu}_y^2}, \quad \text{tg } \varphi = \frac{\bar{\mu}_x}{\bar{\mu}_y} \quad (6)$$

На рисунке изображены полученные средние абсолютные движения I и II групп звезд в трех областях неба. Радиусы окружностей (рисунк) соответствуют средней квадратической ошибке определения среднего абсолютного движения звезд. Величина среднего движения I группы звезд сравнима с ошибками его определения и значительно меньше среднего движения II группы звезд. Следовательно, I группа звезд действительно находится на более далеком расстоянии, чем II. Таким образом, при использовании I группы звезд как опорных, значения редуций абсолютизации, полученных по галактикам, должны уменьшаться по величине в сравнении с использованием всех возможных опорных звезд.

Кроме того, наблюдаемые направления среднего движения II группы звезд хорошо согласуются с известными направлениями параллактических смещений звезд в каждой из областей неба (рисунок). Это свидетельствует о том, что при применении метода максимума правдоподобия общая совокупность опорных звезд на достаточно высоких галактических широтах может быть разделена на две различные по кинематическим параметрам реально существующие группы звезд.

Затем проводили оценку величины космической ошибки в относительных собственных движениях звезд на краю рабочего поля пластинок в зависимости от выбора системы опорных звезд. Рассматривали два случая выбора опорных звезд: в первом — опорными служили все звезды слабее 13.0^m с движениями менее $0.05''$ в год (обычный случай), во втором — отобранные из их количества звезды I группы. Вычисления значений возможной космической ошибки выполняли для выбора опорных звезд и трех областей неба по формуле [5]:

$$(\epsilon_r')^2 = (\sigma'_{x,y})^2 \left(\frac{x^2}{P_a} + \frac{y^2}{P_b} + \frac{1}{P_c} \right), \quad (7)$$

где x, y — прямоугольные координаты звезды на краю рабочего поля, P_a, P_b, P_c — веса постоянных связи пластинок двух эпох, $(\sigma'_{x,y})^2$ — средняя дисперсия движений рассматриваемой группы звезд, исправленная за влияние случайных ошибок. Значения весов P_a, P_b, P_c находили по данным [5] в зависимости от среднего количества предполагаемых опорных звезд в площадке данной области.

При вычислении дисперсии истинных движений звезд использовали следующие значения средних квадратических ошибок их определения: для 2-й и 3-й области неба — $\pm 0.006''$ в год [4], для 1-й это значение соответствовало $\pm 0.0075''$ в год. В результате, средний по трем областям стандарт истинного распределения собственных движений I группы звезд составляет $\pm 0.004''$ в год, второй — $\pm 0.013''$ в год. Значения космических ошибок ϵ_r'' в собственных движениях звезд на краю рабочего поля пластинок ($r=30'$) в зависимости от выбора системы опорных звезд приведены в табл. 4. Для сравнения приводятся значения ошибок ϵ_r'' , возникающих вследствие случайных ошибок измерений разностей координат опорных звезд. Эти ошибки вычислялись по формуле (7), где вместо $\sigma'_{x,y}$ использовали характерную для 400 мм астрографа обсерватории среднюю квадратичную ошибку определения собственного движения одной звезды по одной паре пластинок при разностях эпох 20 и 30 лет, соответственно равную $\pm 0.0084''$ в год и $\pm 0.0056''$ в год.

В случае обычно выбираемой системы опорных звезд (табл. 4) космическая ошибка в 1.5—2 раза больше ϵ_r'' . Когда опорными служат звезды I группы, наблюдается обратное соотношение между этими ошибками. Само значение космической ошибки в первом случае составляет 75 % точности определения μ по двум парам пластинок при разности эпох 20 лет, во втором — только 25 %. Из этого следует явное преимущество звезд I группы как системы опорных по сравнению с

Таблица 4. Значения ошибок ϵ_r' и ϵ_r'' для трех областей неба в зависимости от выбора системы опорных звезд (в $0.0001''$ в год)

Номер области	Все звезды				I группа звезд			
	Количество	$\tau=20$ лет ϵ_r''	$\tau=30$ лет ϵ_r''	ϵ_r'	Количество	$\tau=20$ лет ϵ_r''	$\tau=30$ лет ϵ_r''	ϵ_r'
1	103	± 27	± 18	± 41	68	± 31	± 20	± 15
2	79	29	19	48	37	33	22	14
3	72	32	20	46	27	35	23	15

обычно используемой системой. Это преимущество достигается увеличением объема вычислений, что при наличии современных ЭВМ не имеет принципиального значения.

Таким образом, при определении относительных собственных движений звезд на высоких галактических широтах в качестве опорных можно использовать звезды с собственными движениями, величины которых сравнимы с ошибками их определения. В результате этого почти в 3 раза уменьшается влияние космических ошибок по сравнению с обычно применяемой системой опорных звезд.

Анализируя параметры двух распределений собственных движений опорных звезд, можно объединять отдельные площадки. Это дает возможность повысить в 2 раза точность определения редуций абсолютизации, получая их по совокупности галактик нескольких площадок.

1. Дейч А. Н. Об эффекте собственных движений опорных звезд.— Астрон. журн., 1974, 51, с. 1095—1099.
2. Жуков Л. В. К вопросу о редуции относительных фотографических собственных движений к абсолютным.— Астрон. журн., 1966, 43, с. 1107—1110.
3. Рыбка С. П. Каталог собственных движений звезд в избранных площадках неба с галактиками. I.— Киев, 1978, Ч. I.—72 с. (Депонир. рукопись ВИНТИ, № 3792—78 Деп.).
4. Рыбка С. П. О построении сводного каталога абсолютных собственных движений звезд.— Письма в Астрон. журн., 1980, 6, с. 55—57.
5. Рыбка С. П. О точности определения относительных собственных движений звезд по пластинкам длиннофокусного астрографа ГАО АН УССР.— Астрометрия и астрофизика, 1984, вып. 53, с. 37—41.
6. Фатчихин Н. В. Вековые параллаксы звезд и скорость Солнца в пространстве по абсолютным собственным движениям 14600 звезд относительно галактик.— Астрон. журн., 1973, 50, с. 377—389.
7. Харченко Н. В. Каталог собственных движений звезд в избранных площадках неба. II.— Киев, 1980, Ч. II.—152 с. (Депонир. рукопись ВИНТИ, № 3533—80 Деп.).
8. Харченко Н. В. О разделении гигантов и звезд главной последовательности по абсолютным собственным движениям.— Астрометрия и астрофизика, 1980, 40, с. 44—51.
9. Klemola A. R., Vasilevskis S. A study of Solar motion and galactic rotation.— Publ. Lick observ., 1971, 22, part 3, p. 1—13.
10. Sanders W. L. An improved method for computing membership probabilities in open clusters.— Astron. and Astrophys., 1971, 14, p. 226—232.

Главная астрономическая обсерватория АН УССР,
Киев

Поступила в редакцию
16.07.1984