

АСТРОНОМИЯ

УДК 521.328

MSC 85A05

**Определение орбит визуально-двойных звезд,
открытых Отто Струве в Пулково***А. Э. Байдин¹, Н. И. Перов², Л. Г. Романенко³*¹ Ярославский государственный медицинский университет,

Российская Федерация, 150000, Ярославль, ул. Революционная, 5

² Ярославский государственный педагогический университет им. К. Д. Ушинского,

Российская Федерация, 150000, Ярославль, ул. Республиканская, 108

³ Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН,

Российская Федерация, 196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, 65

Для цитирования: Байдин А. Э., Перов Н. И., Романенко Л. Г. Определение орбит визуально-двойных звезд, открытых Отто Струве в Пулково // Вестник СПбГУ. Математика. Механика. Астрономия. 2018. Т. 5 (63). Вып. 1. С. 154–164. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu01.2018.117>

Впервые определены орбиты 17 визуально-двойных звезд, открытых Отто Струве в Пулково: STT 28, 75, 119, 132, 182, 201, 228, 241, 250, 296, 369, 383, 424, 430, 435, 462, 520. Использованы как визуальные наблюдения XIX–XX веков, полученные с помощью микрометров, так и современные наблюдения согласно четвертому интерферометрическому каталогу. Все представленные звезды наблюдались больше сотни лет, но их наблюдения покрывают дуги только от 10 до 50°. Есть трудности при определении орбит на основе наблюдений коротких дуг. В этой работе предложен новый метод, улучшающий метод Харткопфа и др. Новый метод является глобально сходящимся и использует генетические алгоритмы для экономии времени вычислений. Для повышения точности получаемых результатов мы использовали дополнительные данные: суммы масс и относительные лучевые скорости компонент. Массы оценивались по фотометрическим данным каталога Tucho. Новые орбиты 17 звезд получены только с учетом значений сумм масс, так как данные о лучевых скоростях для них отсутствуют. Все эти звезды расположены далеко от Солнца, поэтому их орбиты можно считать предварительными. С использованием лучевой скорости определена орбита только STT 547. Это — контрольная звезда, так как в литературе есть много вариантов ее орбиты, которые были получены различными авторами, и лучевые скорости компонентов известны. Мы получили три варианта орбит для этой звезды. Все орбиты согласуются друг с другом и с современными наблюдениями, а вычисленные динамические массы соответствуют фотометрическим данным. В работе также вычислена ориентация полученных орбит

в галактической системе координат: в 11 из 18 случаев плоскости этих орбит круто наклонены к плоскости Галактики.

Ключевые слова: визуально-двойные звезды, элементы орбит, методы определения орбит, генетические алгоритмы, ориентация орбит в галактической системе координат.

Введение. С 40-х годов XIX века Отто Струве начал наблюдения визуально-двойных звезд в Пулковско. В ходе научной работы, продолжавшейся несколько десятилетий, было отобрано и изучено 547 пар, составлен каталог [1, 2]. На рубеже XIX и XX веков систематическое исследование звезд этого каталога провел Хусей [3]. Многие звезды, открытые Отто Струве, регулярно наблюдаются по настоящее время [4]. Среди них немногим более чем у сотни объектов определены орбиты (см., например, 6-й каталог [5]). В основном (55%) это пары с периодами от 100 до 500 лет, более 30% — с периодами, превосходящими 500 лет. Целью данной работы является определение орбит двойных звезд каталога Отто Струве с медленным орбитальным движением.

В работе впервые определяются орбиты следующих объектов: STT 28, 75, 119, 132, 182, 201, 228, 241, 250, 296, 369, 383, 424, 430, 435, 462, 520. Перечисленные пары не являются удобными для изучения относительного движения, так как наблюдениями охвачены дуги от 10 до 50°, большая часть наблюдений выполнена визуально с помощью микрометров. В таких условиях трудно ожидать сходимости большинства известных методов [6, 7]. Для определения орбит использовался улучшенный нами метод Харткопфа и др. [8], так как три неизвестные определялись не подбором, а с помощью генетических алгоритмов (ГА) [9]. Метод Харткопфа и др. является глобально сходящимся, но при работе на коротких дугах с визуальными наблюдениями у большинства звезд сумма масс компонент, оцененная динамически, значительно отличалась от суммы масс, оцененной фотометрически. По этой причине при выборе решений в ходе выполнения генетического алгоритма было наложено дополнительное условие на значение суммы масс компонент.

В работе представлена уточненная орбита STT 547. У этой звезды накоплен довольно продолжительный ряд фотографических наблюдений, кроме того, измерена относительная лучевая скорость [10], поэтому орбита определялась без использования дополнительного условия на значение суммы масс компонент.

Описанный в работе метод для повышения точности получаемых результатов может использовать дополнительные данные: сумму масс компонент и относительную лучевую скорость, но эти величины не являются обязательными для определения орбиты. Метод позволяет определять первоначальные орбиты широких медленно движущихся пар с периодами более 1000 лет. Подобные объекты являются самыми малоизученными, в 6-м каталоге орбит [5] они составляют всего 7%. В будущем полученные орбиты можно будет уточнить.

В настоящее время полученные в данной работе орбиты планируется использовать в Пулковской обсерватории для статистического исследования ориентации плоскостей орбит в галактической системе координат. 17 новых орбит являются заметным вкладом в исследуемый статистический материал.

Метод определения орбит. Харткопф и др. [8] предложили метод определения орбит визуально-двойных звезд, в котором три неизвестные (n , T_p , e) определялись подбором. Алгоритм метода следующий.

1. Задаются величины, определяемые подбором: среднее движение (n), момент прохождения периастра (T_p), эксцентриситет (e).

2. Из уравнения Кеплера вычисляются эксцентрические аномалии на моменты наблюдений (T_i). Для всех моментов времени определяются приведенные координаты (X_i, Y_i). Составляется система $2N$ уравнений

$$x_i = AX_i + FY_i, \quad y_i = BX_i + GY_i. \quad (1)$$

Система (1) решается методом наименьших квадратов, в качестве неизвестных выступают элементы Тиле—Иннеса: A, B, F, G .

3. Выбираются значения n, T_p и e , при которых суммы квадратов невязок будут минимальны.

Описанный метод является глобально сходящимся. Три величины, определяемые подбором, мы предлагаем искать посредством генетических алгоритмов. В этом случае значительно сокращается время вычисления элементов орбит и повышается точность получаемых результатов.

Улучшенный нами метод с тремя величинами, определяемыми генетическими алгоритмами, может быть использован для определения орбит по коротким дугам $\sim 20\text{--}50^\circ$. Единственное ограничение связано с тем, что наблюдения должны быть очень точны. Например, в работе [11] при тестировании нашего метода элементы орбит определялись только по данным интерферометра РТИ [12], большинство результатов, полученных на дугах $\sim 20\text{--}70^\circ$, были близки элементам орбит, представленным в шестом каталоге орбит [5].

Большая часть наблюдений двойных звезд, открытых Отто Струве, является визуальными, относительные ошибки наблюдений для многих объектов по нашим представлениям примерно на два порядка больше относительных ошибок РТИ. Численные эксперименты показывают, что вычисленные элементы орбит в этом случае сильно отличаются от реальных. Повысить точность определения орбит можно с помощью дополнительных данных: сумм масс компонент и относительных лучевых скоростей. Наиболее простой подход — ввести коэффициенты, изменяющие суммы квадратов отклонений:

$$k_{MS} = 1 + \frac{|MS_{AB(ph)} - MS_{AB(cal)}|}{MS_{AB(ph)}}, \quad k_{V_s} = 1 + \frac{|V_{rBA(obs)} - V_{rBA(cal)}|}{V_{sBA}}, \quad (2)$$

где $MS_{AB(ph)}$ — сумма масс, оцененная фотометрически, $MS_{AB(cal)}$ — сумма масс, вычисленная с помощью элементов орбит, $V_{rBA(obs)}$ и $V_{rBA(cal)}$ — наблюдаемая и вычисленная по элементам орбит относительная лучевая скорость, $V_{sBA} = \sqrt{V_{tBA}^2 + V_{rBA(obs)}^2}$ — пространственная скорость звезды-спутника относительно главной компоненты, V_{tBA} — проекция относительной скорости на картинную плоскость (вычисляется с помощью разложений относительных координат по времени).

Генетические алгоритмы работают с совокупностью эволюционирующих решений. Выбираются решения, дающие минимальные суммы квадратов отклонений. Для визуальных наблюдений по нашим представлениям $\sigma_{\Delta\rho}$ примерно в два раза больше $\sigma_{\rho\Delta\theta}$, для данных четвертого интерферометрического каталога [13] имеем $\sigma_{\Delta\rho} \approx \sigma_{\rho\Delta\theta}$ (значения этих ошибок для исследуемых звезд представлены ниже, см. табл. 2), поэтому основное условие для выбора элементов орбит следующее:

$$\chi^2 = \chi_{int}^2 + \chi_{vis}^2 = \min, \quad (3)$$

где

$$\chi_{int}^2 = k_{MS}k_{V_s} \sum p_i(int) ((x_i(obs) - x_i(cal))^2 + (y_i(obs) - y_i(cal))^2), \quad (4)$$

$$\chi_{vis}^2 = k_{MS} k_{V_s} \sum p_{i(vis)} \left((\rho_{i(obs)} - \rho_{i(cal)})^2 + 4 * \rho_{i(cal)}^2 (\theta_{i(obs)} - \theta_{i(cal)})^2 \right). \quad (5)$$

Весы наблюдений (p_i) задавались в соответствии с точностью широко распространенных техник измерений [13, 14].

Наиболее известным методом, позволяющим определить орбиту по наблюдениям на коротких дугах, является метод параметров видимого движения (ПВД) [15, 16]. Он успешно применяется для определения орбит двойных звезд уже более тридцати лет [16, 17]. Чтобы определить орбиту с помощью метода ПВД, необходимо знать сумму масс компонент и относительную лучевую скорость. Для определения орбиты представленным в данной работе методом можно использовать сумму масс компонент и относительную лучевую скорость одновременно или применить только одну из этих величин. В электронных базах данных наблюдения лучевых скоростей компонент изучаемых в работе звезд отсутствуют. При вычислении орбит использовалась только сумма масс, оцененная фотометрически.

Особенности определения масс изучаемых звезд. Сложность в оценке масс звезд заключается в том, что, используя разные подходы, мы часто приходим к разным результатам. Кроме того, параллаксы исследуемых звезд малы, следовательно, имеют большие ошибки, что сказывается на точности определения абсолютных звездных величин.

Если абсолютные звездные величины M_v и показатели цвета $B - V$ согласовывались со среднестатистическими характеристиками звезд главной последовательности [18], массы вычислялись по зависимости масса-светимость [19]. Если значения M_v и $B - V$ соответствовали характеристикам гигантов, массы определялись по спектральным классам [18]. Если M_v и $B - V$ плохо согласовывались со среднестатистическими характеристиками звезд спектральных классов, массы оценивались с помощью эволюционных треков [20]. Кроме того, проверялось соответствие значений M_v , $B - V$ и полученных масс со спектральными классами каталога WDS [4] и электронного каталога [21].

Звездные величины компонент и показатели цвета $B - V$ были выбраны из каталога двойных звезд TYCHO [22], болометрические поправки — из работы [23], тригонометрические параллаксы — из каталога HIPPARCOS [24]. Только при работе со звездой STT 383 использовался параллакс версии 1997 года [25]. В табл. 1 представлены полученные нами величины масс звезд (MS), а также P , a , i , Ω , T_p , e , ω — кеплеровы элементы орбит.

Элементы орбит. Исследования проводились в несколько этапов.

1. Был изучен наблюдательный материал по всем звездам каталога Отто Струве [1]. Использовались визуальные наблюдения электронной базы в Ницце [26], старые наблюдения из работы [3], данные WDS [4] и современные наблюдения четвертого интерферометрического каталога [13]. Выбирались звезды, у которых имеются непрерывные ряды наблюдений на дугах более 10° .

2. Изучалась информация каталогов WDS, TDS, HIPPARCOS [4, 22, 25, 24] и общая информация по каждой звезде электронной базы данных в Страсбурге. Из рассмотрения были исключены следующие объекты: не включенные в список каталога HIPPARCOS; не имеющие фотометрических данных отдельно по каждой компоненте; пары, у которых одна из компонент является спектрально-двойной или затменно-двойной.

3. Определялись орбиты звезд. Полученные результаты представлены в табл. 1. Дополнительная информация по наблюдательному материалу дана в табл. 2, где

Таблица 1. Элементы орбит

STT/WDS	P , год	a , "	i , °	Ω , °	T_p , год	e	ω , °	MS	l_Q/b_Q , °
28	870	0.877	124.8	136.1	1758.4	0.382	86.1	3.4	89
01191+8052	± 34	± 0.024	± 0.7	± 0.3	± 2.4	± 0.005	± 3.9	(1)	-25
75	862	0.604	77.9	167.7	1861.0	0.071	346.0	4.6	45
04186+6030	± 106	± 0.048	± 0.4	± 0.2	± 68.0	± 0.060	± 32.0	(2)	-57
119	944	1.132	66.0	110.3	1782.8	0.701	105.1	3.0	330
05479+0758	± 105	± 0.085	± 0.9	± 1.7	± 3.2	± 0.006	± 3.6	(1)	-38
132	9679	3.773	60.1	20.5	1728.3	0.220	276.8	3.6	306
06082+3759	± 2451	± 0.610	± 2.0	± 2.7	± 364.4	± 0.063	± 25.2	(1)	+30
182	1661	1.094	146.7	20.6	2228.8	0.292	90.4	4.4	247
07527+0323	± 185	± 0.083	± 4.3	± 2.8	± 27.6	± 0.022	± 15.3	(2)	+35
201	1883	1.392	140.3	29.4	2288.0	0.274	268.2	2.9	262
09239+2754	± 170	± 0.087	± 2.9	± 5.5	± 32.3	± 0.046	± 15.2	(1)	+62
228	1229	1.069	101.7	164.6	2102.8	0.548	58.7	3.2	215
10473+2235	± 270	± 0.155	± 0.6	± 0.8	± 9.6	± 0.031	± 9.5	(1)	-17
241	5855	2.859	25.8	8.2	1581.5	0.574	46.2	3.7	10
11563+3527	± 712	± 0.230	± 5.1	± 10.6	± 15.6	± 0.011	± 16.6	(1)	-51
250	1055	0.652	73.6	174.9	2059.4	0.770	270.3	3.7	220
12244+4305	± 320	± 0.131	± 1.8	± 1.5	± 1.0	± 0.010	± 8.2	(1)	-20
296	9107	6.742	136.5	44.0	1771.7	0.695	59.0	2.5	32
15264+4400	± 7046	± 3.239	± 7.7	± 6.9	± 23.8	± 0.100	± 15.8	(1)	+23
369	1055	0.784	123.3	39.3	2676.5	0.161	262.4	4.2	78
19071+7204	± 31	± 0.016	± 0.5	± 0.4	± 41.3	± 0.011	± 6.4	(1)	-27
383	1125	0.893	101.0	15.1	2176.5	0.417	100.8	5.0	110
19429+4043	± 186	± 0.104	± 2.0	± 1.2	± 7.6	± 0.089	± 15.1	(2)	-66
424	1629	0.547	121.2	128.2	1686.3	0.223	89.9	4.2	3
20593+1534	± 4	± 0.001	± 0.2	± 1.0	± 1.5	± 0.022	± 0.9	(1)	-9
430	2504	4.094	100.9	113.3	3132.4	0.806	88.5	1.7	348
21120+2410	± 459	± 0.491	± 1.1	± 5.0	± 290.0	± 0.018	± 5.0	(2)	-20
435	3542	1.520	65.9	122.5	4577.6	0.026	359.2	2.2	303
21214+0253	± 110	± 0.032	± 0.3	± 1.0	± 244.1	± 0.038	± 20.8	(3)	+11
462	3710	1.968	117.1	163.6	2262.4	0.347	278.1	3.4	32
22070+3605	± 449	± 0.157	± 0.9	± 1.0	± 53.1	± 0.021	± 12.8	(2)	+11
520	1279	0.855	55.5	126.5	1631.7	0.411	121.5	4.65	317
07138+2830	± 231	± 0.103	± 2.1	± 5.8	± 38.4	± 0.027	± 12.5	(2)	-57
547(1)	592.4	6.564	54.15	8.79	2093.2	0.141	239.65	1.17	244
00057+4549	± 48.0	± 0.323	± 0.73	± 1.30	± 22.0	± 0.012	± 19.50	(4)	-5
547(2)	578.9	6.474	53.96	9.13	2100.5	0.140	245.47	1.17	245
00057+4549	± 2.3	± 0.010	± 0.02	± 0.12	± 1.1	± 0.002	± 1.02	(4)	-6
547(3)	669.6	7.093	55.43	7.48	2061.4	0.175	216.16	1.15	243
00057+4549	± 147.6	± 0.908	± 1.33	± 3.66	± 48.8	± 0.079	± 36.42	(4)	-5
547 [5]	509.65	6.21	54.9	13.5	2115.80	0.22	267.2	1.4	246
00057+4549	± 96.99	± 0.77	± 2.4	± 2.3	± 123.47	± 0.04	± 27.4	(4)	-9

Примечания по методам определения масс компонент (MS): 1 — по эволюционным трекам [20], 2 — по зависимости масса-светимость [19], 3 — с использованием спектрального класса [18], 4 — с помощью третьего закона Кеплера. Номер метода заключен в скобки.

использованы следующие обозначения: N_{vis} , N_{int} — количество визуальных наблюдений [3, 4, 26] и наблюдений, входящих в четвертый интерферометрический каталог [13], T_1 , T_N — эпоха первого и последнего наблюдений, $\Delta\theta$ — длина дуги, охваченная наблюдениями, $\bar{\sigma}_{\Delta\rho}$, $\bar{\sigma}_{\rho\Delta\theta}$ — взвешенные среднеквадратичные отклонения ($\bar{\sigma}_{\Delta\rho} = \sqrt{\sum p_i * (\rho_{i(obs)} - \rho_{i(cal)})^2 / \sum p_i}$), $\sum p_{int(\theta)} / \sum p_{vis(\theta)}$ — отношение суммарного веса интерферометрических наблюдений θ к суммарному весу визуальных.

Таблица 2. Параллаксы звезд и информация о наблюдениях

STT	π_t , mas	N_{vis}	N_{int}	T_1 , год	T_N , год	$\Delta\theta$, °	visual		int		$\frac{\sum P_{int(\theta)}}{\sum P_{vis(\theta)}}$
							$\bar{\sigma}_{\Delta\rho}$, "	$\bar{\sigma}_{\rho\Delta\theta}$, "	$\bar{\sigma}_{\Delta\rho}$, "	$\bar{\sigma}_{\rho\Delta\theta}$, "	
28	6.40	42	3	1845	2006	38	0.085	0.036	0.008	0.016	0.415
75	4.01	24	9	1843	2006	21	0.052	0.012	0.002	0.006	23.6
119	8.16	57	5	1843	2009	50	0.079	0.031	0.047	0.031	0.541
132	5.42	30	3	1843	2012	15	0.117	0.061	0.019	0.012	0.567
182	4.76	93	15	1843	2015	35	0.103	0.043	0.018	0.015	1.45
201	6.40	85	8	1843	2015	26	0.108	0.051	0.026	0.023	0.477
228	6.32	81	11	1843	2015	35	0.070	0.024	0.007	0.005	7.18
241	5.69	116	14	1843	2011	25	0.127	0.048	0.037	0.015	0.945
250	4.07	41	26	1843	2009	22	0.043	0.022	0.002	0.003	75.4
296	11.37	157	15*	1843	2015	52	0.116	0.044	0.034	0.013	0.689
369	4.69	43	17	1843	2015	36	0.056	0.025	0.013	0.018	3.06
383	4.83	45	8	1843	2015	10	0.062	0.027	0.010	0.006	1.15
424	2.45	43	5	1846	2008	25	0.065	0.029	0.007	0.009	4.47
430	18.60	35	3	1844	2013	22	0.088	0.073	0.008	0.023	0.969
435	5.03	60	15	1848	2016	39	0.067	0.027	0.010	0.010	21.2
462	5.46	41	6	1844	2014	17	0.098	0.043	0.008	0.021	0.704
520	4.35	48	2	1851	1996	39	0.070	0.036	0.038	0.021	0.054
547	88.44	113	201*	1876	2013	76	0.090	0.052	0.013*	0.010*	23.3*

Примечания: * — для STT 296 включены 4 фотографических наблюдения, для STT 547 представленная информация относится только к фотографическим наблюдениям [4] и ПЗС-наблюдениям, выполненным в ГАО РАН [4, 27], $\bar{\sigma}_{\Delta\rho}$, $\bar{\sigma}_{\rho\Delta\theta}$ определены для орбиты STT 547(1) табл. 1.

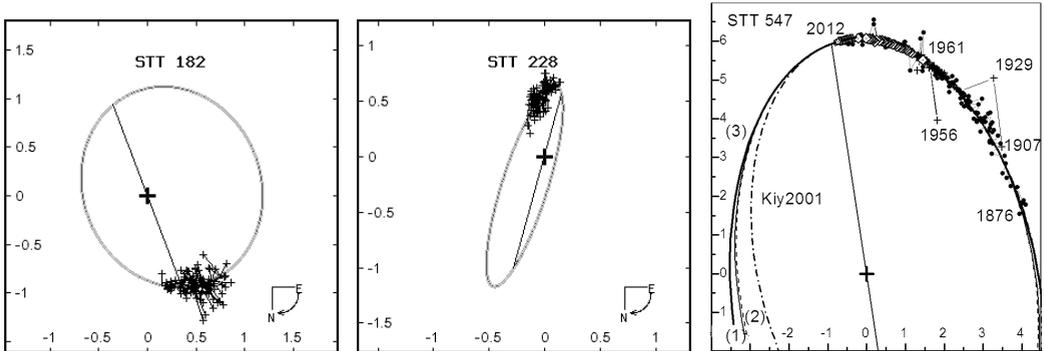


Рис. Орбиты и наблюдения для STT 182, 228 и 547. Прямая линия соответствует линии узлов. Обозначения к третьему графику: тонкая линия — орбита (1), прерывистая линия — (2), сплошная линия — (3); штрих-пунктирная линия — орбита Кияевой и др. [5], точки — визуальные наблюдения 1876–2001 гг. по данным каталога WDS [4], ромбики — пулковские фотографические наблюдения 1961–2000 гг. [4], звездочки — пулковские ПЗС-наблюдения 2003–2012 гг. [4, 27].

Наблюдаемые угловые расстояния между компонентами большинства изучаемых в работе пар лежат в диапазоне 0.4–2'', исключение составляет STT 547 (ρ меняется от 4.5 до 6''). В качестве величин, характеризующих погрешность вычислений, в табл. 1 даны среднеквадратичные отклонения элементов орбит, полученные по результатам двадцати запусков генетического алгоритма. Орбиты трех исследуемых звезд совместно с используемыми наблюдениями для примера изображены на рисунке.

Элементы орбиты STT 547 определялись с использованием всех фотографических наблюдений по данным каталога WDS [4] и ПЗС-наблюдений, выполненных в ГАО РАН [4, 27]. Применялось несколько методов: 1) улучшенный нами метод Харткопфа и др. [8, 11], в котором три величины находятся с помощью генетических алгоритмов; 2) описанный в данной работе метод с коэффициентом k_{V_s} с использованием относительной лучевой скорости $V_{rBA(obs)} = -3.07 \pm 0.18$ км/с по данным А. А. Токониной [10]; 3) метод, в основе которого лежит алгоритм метода ПВД [16, 28]. В последнем случае погрешности в табл. 1 оценены с помощью подхода, предложенного А. А. Киселевым [29]. Все перечисленные методы при вычислении элементов орбит данной звезды не используют сумму масс компонент, значения суммы масс для STT 547, представленные в табл. 1, вычислены по элементам орбиты согласно третьему закону Кеплера. Отметим, что все орбиты, полученные разными методами для этой звезды, хорошо согласуются между собой (см. график на рисунке).

В последнем столбце табл. 1 приведены галактические долгота (l_Q) и широта (b_Q) направления на полюса плоскостей полученных орбит. Большинство орбит (11 из 18) круто наклонены к плоскости Галактики ($|b_Q| \leq 30^\circ$), то есть в этих случаях наклон плоскостей орбит к плоскости Галактики превышает 60° .

Заключение. Впервые вычислены орбиты 17 звезд, открытых Отто Струве в Пулково. Все изученные двойные системы имеют периоды обращения более 500 лет, а большие полуоси орбит — более 100 а. е. Очевидно, что изучаемые в данной статье объекты являются далекими двойными звездами, а полученные орбиты — предварительными. Однако известно, что широкие долгопериодические двойные звезды являются наименее изученными объектами, в 6-м каталоге орбит они составляют всего 7%. Есть подозрение, что их орбиты круто наклонены к плоскости Галактики [30]. Возможно, это связано с еще неизученными особенностями строения Галактики. Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо иметь достаточный статистический материал, поэтому определение орбит широких пар продолжает быть актуальной задачей.

Рассмотренный в данной работе метод позволяет определять орбиты по малым дугам ($10\text{--}50^\circ$), при этом нам приходится использовать оценки масс и относительной лучевой скорости, но эти величины не являются жестко закрепленными и необходимыми, а позволяют повысить надежность результата, полученного с применением генетических алгоритмов.

Для STT 547 орбита (3) получена модифицированным нами методом ПВД, но в отличие от орбиты Кияевой и др. [5] вычисленная по нашей орбите масса больше соответствует спектральным классам [4, 21].

Предложенный нами метод работает лучше, если он опирается на высокоточные наблюдения и использует относительные лучевые скорости. Применить такой подход можно для очень ограниченного количества двойных систем, так как у многих тесных пар ($\rho \approx 1''$) отсутствуют наблюдения лучевых скоростей. Данная трудность вскоре после опубликования результатов космической миссии GAIA будет решена, появится возможность определения сотен новых орбит и уточнения многих уже вычисленных описанным в данной работе методом.

Исследование выполнено с использованием Вашингтонского каталога двойных звезд (WDS [4]), созданного в Военно-морской обсерватории США. Авторы выражают глубокую благодарность его создателям.

Выбор звезд, наиболее удобных для исследования, был осуществлен благодаря данным сайта обсерватории в Ницце [26]. Авторы благодарят создателей этого сайта.

Литература

1. *Struve O. W.* Catalogue de 514 Étoiles Doubles et Multiples découvertes sur l'hémisphère céleste boréal par la grande lunette de l'Observatoire Central de Poulkova, et Catalogue de 256 Étoiles Doubles Principales où la distance des composantes est de 32 secondes à 2 minutes et qui se trouvent sur l'hémisphère boréal. St. Petersburg: Imperial Academy of Sciences, 1843.
2. *Struve O. W.* On some lately discovered double stars // MNRAS. 1859. Vol. 20, issue 1. P. 8–13. <https://doi.org/10.1093/mnras/20.1.8>
3. *Hussey W. J.* Micrometrical observations of the double stars discovered at Pulkowa made with the thirty-six-inch and twelve-inch refractors of the Lick Observatory, together with the mean results of the previous observations of these stars. Publications of Lick Observatory. 1901. Vol. 5. P. 3–227.
4. *Mason B. D., Wycoff G. L., Hartkopf W. I.* The Washington Visual Double Star Catalogue. Washington: US Naval Observatory, 2016. URL: <http://ad.usno.navy.mil/wds/wds.html> (дата обращения: 06.10.2017).
5. *Hartkopf W. I., Mason B. D.* Sixth Catalog of Orbits of Visual Binary Stars. Washington: US Naval Observatory, 2016. URL: <http://ad.usno.navy.mil/wds/orb6.html> (дата обращения: 06.10.2017).
6. *Купто П.* Наблюдения визуально-двойных звезд. М.: Мир, 1981. 238 с.
7. *Субботин М. Ф.* Введение в теоретическую астрономию. М.: Наука, 1968. 800 с.
8. *Hartkopf W. I., McAlister H. A., Franz O. G.* Binary star orbits from speckle interferometry. II. Combined visual/speckle orbits of 28 close systems // Astron. J. 1989. Vol. 98. P. 1014–1039.
9. *Michalewicz Z.* Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs. Berlin: Springer, 1996. 388 p.
10. *Токовинин А. А.* Лучевые скорости компонентов широких визуально-двойных звезд // Астрон. журн. 1994. Т. 71. С. 293–296.
11. *Байдин А. Э.* Определение орбит визуально-двойных звезд с помощью генетических алгоритмов // Вестник ЮУрГУ, серия «Математика. Механика. Физика». 2015. Vol. 7, № 1. С. 11–19.
12. *Colavita M. M., Wallace J. K., Hines B. E., et al.* The Palomar Testbed Interferometer // Astrophys. J. 1999. Vol. 510. P. 505–521.
13. *Hartkopf W. I., Mason B. D., Wycoff G. L., McAlister H. A.* Fourth Catalog of Interferometric Measurements of Binary Stars. Washington: US Naval Observatory, 2016. URL: <http://ad.usno.navy.mil/wds/int4.html> (дата обращения: 06.10.2017).
14. *Hartkopf W. I., Mason B. D., Worley C. E.* The 2001 US Naval Observatory Double Star CD-ROM. II. The Fifth Catalog of Orbits of Visual Binary Stars // Astron. J. 2001. Vol. 122. P. 3472–3479.
15. *Быков О. П., Холшевников К. В.* Прямые методы определения орбит небесных тел. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2013. 150 с.
16. *Киселев А. А., Кияева О. В.* Определение орбиты визуально-двойной звезды методом параметров видимого движения из наблюдений на короткой дуге // Астрон. журн. 1980. Т. 57. С. 1227–1241.
17. *Кияева О. В., Романенко Л. Г., Жучков Р. Я.* Новые орбиты широких визуально-двойных звезд // Письма в Астрон. журн. 2017. Т. 43. С. 354–369. <https://doi.org/10.7868/S0320010817040040>
18. *Cox A. N.* Allen's astrophysical quantities. 4th ed. New York: AIP Press; Springer, 2000. 719 p.
19. *Salaris M., Cassisi S.* Evolution of stars and stellar populations. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2005. 388 p.
20. *Girardi L., Bressan A., Bertelli G., Chiosi C.* Evolutionary tracks and isochrones for low- and intermediate-mass stars: From 0.15 to 7 M_{Sun} , and from $Z=0.0004$ to 0.03 // Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 2000. Vol. 141. P. 371–383. <https://doi.org/10.1051/aas:2000126>
21. *Skiff B. A.* General catalogue of stellar spectral classifications. Flagstaff: Lowell Observatory, 2014. URL: <http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-source=B/mk> (дата обращения: 06.10.2017).
22. *Fabrizius C., Hog E., Makarov V. V., et al.* The Tycho double star catalogue // Astron. Astrophys. 2002. Vol. 384. P. 180–189.
23. *Flower P. J.* Transformations from theoretical Hertzsprung-Russell diagrams to colormagnitude diagrams: effective temperatures, B-V colors, and bolometric corrections // Astrophys. J. 1996. Vol. 469. P. 355–365.
24. *van Leeuwen F.* Validation of the new Hipparcos reduction // Astron. Astrophys. 2007. Vol. 474. P. 653–664.
25. The Hipparcos and Tycho catalogues. ESA, 1997. URL: <http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-source=I/239> (дата обращения: 06.10.2017).
26. The double star website of Nice Observatory. URL: <http://sidonie.obs-nice.fr/scripts/SidonieWelcome.asp> (дата обращения: 06.10.2017).

27. *Izmailov I. S., Roshchina E. A.* Astrometric observations of visual binaries using 26-inch refractor during 2007-2014 at Pulkovo // *Astrophys. Bull.* 2016. Vol. 71, issue 2. P. 225–231. <https://doi.org/10.1134/S1990341316020097>

28. *Байдин А. Э.* Особенности определения орбит визуально-двойных звезд на основе наблюдений коротких дуг видимого движения // *Ярославский педагогический вестник, серия «Естественные науки»*. 2010. Т. 3, № 4. С. 32–39.

29. *Киселев А. А.* Теоретические основания фотографической астрометрии. М.: Наука, 1989.

30. *Kisselev A. A., Romanenko L. G.* Orientation of AMP-orbits of Pulkovo programme binary stars in the Galaxy coordinate frame // *Astron. Soc. Pacific Conf. Ser.* 2004. Vol. 316. P. 250–254.

Статья поступила в редакцию 9 августа 2017 г.; рекомендована в печать 21 сентября 2017 г.

Контактная информация:

Байдин Алексей Эдуардович — al.baidin@yandex.ru

Перов Николай Иванович — канд. физ.-мат. наук, доц.; perov@yarplaneta.ru

Романенко Людмила Георгиевна — канд. физ.-мат. наук; lrom@gaoran.ru

Orbits of visual double stars discovered by Otto Struve at Pulkovo

A. E. Baidin¹, N. I. Perov², L. G. Romanenko³

¹ Yaroslavl State Medical University, ul. Revolutzionnaia, 5, Yaroslavl, 150000, Russian Federation

² Yaroslavl State Pedagogical University named after K. D. Ushinsky, ul. Respublikanskaia, 108, Yaroslavl, 150000, Russian Federation

³ Main (Pulkovo) Astronomical Observatory RAS, Pulkovskoe shosse, 65, St. Petersburg, 196140, Russian Federation

For citation: Baidin A. E., Perov N. I., Romanenko L. G. Orbits of visual double stars discovered by Otto Struve at Pulkovo. *Vestnik SPbSU. Mathematics. Mechanics. Astronomy*, 2018, vol. 5 (63), issue 1, pp. 154–164. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu01.2018.117>

Orbits of 17 visual double stars discovered by Otto Struve at Pulkovo STT 28, 75, 119, 132, 182, 201, 228, 241, 250, 296, 369, 383, 424, 430, 435, 462, 520 are calculated for the first time. Both visual observations XIX–XX centuries by means of the micrometric technique and modern observations in according with the fourth interferometric catalog are used. All the presented stars had been observing for more than hundred years. But these observations cover arcs only from 10 to 50 degrees for this long-term interval. There are some problems of orbit determinations if a method based on the of short arc observations. The new method improving a method of Hartkopf et al is suggested in this work. The new method is globally converging and uses genetic algorithms for saving of time of calculations. It is possible to use additional data (sum of masses of the components and relative radial velocities) to increase the accuracy of the results. The relative radial velocities are unknown for presented 17 stars; therefore we use only masses of components which are obtained from photometric data of the Tycho catalog. All these stars are located far from the Sun, therefore their orbits can be considered as preliminary ones. With using the radial velocity value only the orbit of STT 547 is calculated. This is the control star, because there are a lot of variants of this orbit which has been obtained by different authors, and the radial velocities of components are well known. We obtained three variants of the orbit for this star. All the orbits fit with each other and the recent observations, and the calculated dynamic masses are in agreement with photometric data. Orientation of the received orbits in a galactic frame is also calculated and for 11 of 18 cases the planes of the orbits are steeply inclined to the Galaxy plane.

Keywords: visual double stars, orbital elements, new methods of orbit determination, genetic algorithms, orientation of orbits in a galactic reference frame.

References

1. Struve O. W., *Catalogue de 514 Étoiles Doubles et Multiples découvertes sur l'hémisphère céleste boréal par la grande lunette de l'Observatoire Central de Poulkova, et Catalogue de 256 Étoiles Doubles Principales où la distance des composantes est de 32 secondes à 2 minutes et qui se trouvent sur l'hémisphère boréal* (Imperial Academy of Sciences, St. Petersburg, 1843).
2. Struve O. W., "On some lately discovered double stars", *MNRAS* **20**, 8–13 (1859). <https://doi.org/10.1093/mnras/20.1.8>
3. Hussey W. J., *Micrometrical observations of the double stars discovered at Pulkowa made with the thirty-six-inch and twelve-inch refractors of the Lick Observatory, together with the mean results of the previous observations of these stars* (Publications of Lick Observatory, 1901, **5**, pp. 3–227).
4. Mason B. D., Wycoff G. L., Hartkopf W. I., *The Washington Visual Double Star Catalogue* (US Naval Observatory, Washington, 2016). Available at: <http://ad.usno.navy.mil/wds/wds.html> (accessed October 6, 2017).
5. Hartkopf W. I., Mason B. D., *Sixth Catalog of Orbits of Visual Binary Stars* (US Naval Observatory, Washington, 2016). Available at: <http://ad.usno.navy.mil/wds/orb6.html> (accessed October 6, 2017).
6. Couteau P., *L'observation des étoiles doubles visuelles* (Flammarion, Paris, 1978).
7. Subbotin M. F., *Introduction to theoretical astronomy* (Nauka Publ., Moscow, 1968, 800 p.) [in Russian].
8. Hartkopf W. I., McAlister H. A., Franz O. G., "Binary star orbits from speckle interferometry. II. Combined visual/speckle orbits of 28 close systems", *Astron. J.* **98**, 1014–1039 (1989).
9. Michalewicz Z., *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs* (Springer, Berlin, 1996, 388 p.).
10. Tokovinin A. A., "Radial velocities of the components of wide visual double stars", *Astron. Rep.* **38**, 258–261 (1994).
11. Baidin A. E., "Determination of visual double star orbits by means of genetic algorithms", *Bulletin of the South Ural State University, series "Mathematics. Mechanics. Physics"* **7**(1), 11–19 (2015) [in Russian].
12. Colavita M. M., Wallace J. K., Hines B. E., et al., "The Palomar Testbed Interferometer", *Astrophys. J.* **510**, 505–521 (1999).
13. Hartkopf W. I., Mason B. D., Wycoff G. L., McAlister H. A., *Fourth Catalog of Interferometric Measurements of Binary Stars* (US Naval Observatory, Washington, 2016). Available at: <http://ad.usno.navy.mil/wds/int4.html> (accessed October 6, 2017).
14. Hartkopf W. I., Mason B. D., Worley C. E., "The 2001 US Naval Observatory Double Star CD-ROM. II. The Fifth Catalog of Orbits of Visual Binary Stars", *Astron. J.* **122**, 3472–3479 (2001).
15. Bykov O. P., Kholshchikov K. V., *Direct methods of determination of celestial body orbits* (St. Petersburg University Publ., St. Petersburg, 2013, 150 p.) [in Russian].
16. Kiselev A. A., Kiyayeva O. V., "Determination of the orbit of a visual double star with the method of apparent motion parameters from short arc observations", *Soviet Astron.* **24**, 708–722 (1980).
17. Kiyayeva O. V., Romanenko L. G., Zhuchkov R. Ya., "New orbits of wide visual double stars", *Astronomy Letters* **43**(5), 316–331 (2017).
18. Cox A. N., *Allen's astrophysical quantities* (4th ed, AIP Press, Springer, New York, 2000, 719 p.).
19. Salaris M., Cassisi S., *Evolution of stars and stellar populations* (John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2005, 388 p.).
20. Girardi L., Bressan A., Bertelli G., Chiosi C., "Evolutionary tracks and isochrones for low- and intermediate-mass stars: From 0.15 to 7 M_{Sun} , and from $Z=0.0004$ to 0.03", *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **141**, 371–383 (2000). <https://doi.org/10.1051/aas:2000126>
21. Skiff B. A., *General catalogue of stellar spectral classifications* (Lowell Observatory, Flagstaff, 2014). Available at: <http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-source=B/mk> (accessed October 6, 2017).
22. Fabricius C., Hog E., Makarov V. V., et al., "The Tycho double star catalogue", *Astron. Astrophys.* **384**, 180–189 (2002).
23. Flower P. J., "Transformations from theoretical Hertzsprung-Russell diagrams to colormagnitude diagrams: effective temperatures, B-V colors, and bolometric corrections", *Astrophys. J.* **469**, 355–365 (1996).
24. van Leeuwen F., "Validation of the new Hipparcos reduction", *Astron. Astrophys.* **474**, 653–664 (2007).
25. *The Hipparcos and Tycho catalogues* (ESA, 1997). Available at: <http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-source=I/239> (accessed 6, October, 2017).

26. *The double star website of Nice Observatory*. Available at: <http://sidonie.obs-nice.fr/scripts/SidonieWelcome.asp> (accessed October 6, 2017).
27. Izmailov I.S., Roshchina E.A., “Astrometric observations of visual binaries using 26-inch refractor during 2007-2014 at Pulkovo”, *Astrophys. Bull.* **71**, 225–231 (2016). <https://doi.org/10.1134/S1990341316020097>
28. Baidin A. E., “Characteristic properties of determination of visual double star orbits on the basis of observations of short arcs of visible motion”, *Yaroslavl pedagogical bulletin, series “Natural sciences”* **3**(4), 32–39 (2010) [in Russian].
29. Kiselev A. A., *The theoretical bases photographic astrometry* (Nauka Publ., 1989, 264 p.) [in Russian].
30. Kisselev A. A., Romanenko L. G., “Orientation of AMP-orbits of Pulkovo programme binary stars in the Galaxy coordinate frame”, *Astron. Soc. Pacific Conf. Ser.* **316**, 250–254 (2004).

Author's information:

Baidin Aleksey E. — al.baidin@yandex.ru
Perov Nikolay I. — perov@yarplaneta.ru
Romanenko Lyudmila G. — lrom@gaoran.ru