

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРБИТ ВИЗУАЛЬНО-ДВОЙНЫХ ЗВЁЗД С ПОМОЩЬЮ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

А.Э. Байдин¹

Предлагается для определения орбит визуально-двойных звёзд применять генетические алгоритмы (ГА). Рассматриваются три метода: 1) разработанный в CHARA, ранее три неизвестные определялись подбором, использование ГА значительно упрощает и ускоряет работу метода; 2) с помощью ГА определяются все семь элементов орбиты; 3) большая полуось и позиционный угол линии узлов находятся методом наименьших квадратов, остальные элементы орбиты посредством ГА. Методы тестируются на реальных и эталонных данных, используются два языка программирования: Pascal и PHP. В качестве примера определены орбиты Кастора и Сириуса.

Ключевые слова: визуально-двойные звёзды; методы определения орбит; анализ данных; численные методы; генетические алгоритмы.

Введение

Генетические алгоритмы являются стохастическими методами поиска решений различных задач [1]. Идея методов заимствована у природы. Процесс нахождения решений можно сравнить с микроэволюцией – направленным изменением генофонда популяции. В качестве генофонда рассматривается совокупность различных решений, плохо или хорошо удовлетворяющих поставленной задаче. На каждом шаге алгоритма производится скрещивание решений, мутации потомков и отбор, обеспечивающий постепенное улучшение решений. При рассмотрении генетических алгоритмов используются как математические, так и биологические термины: генофонд – совокупность решений задачи на определённом шаге алгоритма, ген или признак – одна из определяемых величин.

В сравнении с обычным подбором генетические алгоритмы значительно ускоряют поиск решения, в отличие от методов, требующих дифференцирования исследуемой функции, являются глобально сходящимися. Эти преимущества привели к широкому распространению генетических алгоритмов, они используются во многих физико-математических областях. В астрономии с их помощью производят обработку спектральных наблюдений звёзд, целью которой является обнаружение экзопланет [2]. Большинство других методов имеют плохую сходимость, когда необходимо выделить несколько периодических возмущений [3].

В данной работе предлагается использовать генетические алгоритмы для определения орбит визуально-двойных звёзд. При постановке задачи используются уравнения, связывающие искомые элементы орбиты с наблюдаемыми величинами

$$\rho_{k(obs)} \approx \rho_{k(cal)} = \rho(T_k, n, a, i, T_p, e, \omega), \quad \theta_{k(obs)} \approx \theta_{k(cal)} = \theta(T_k, n, i, \Omega, T_p, e, \omega), \quad (1)$$

где $\rho_{k(obs)}$ и $\theta_{k(obs)}$ – наблюдаемые полярные координаты звезды-спутника относительно главной компоненты (ρ – расстояние, θ – позиционный угол), $\rho_{k(cal)}$ и $\theta_{k(cal)}$ – координаты, вычисляемые с помощью эпох наблюдений T_k и элементов орбиты (n – среднее движение, a – большая полуось, i – наклонение орбиты, Ω – позиционный угол линии узлов, T_p – эпоха прохождения периастра, e – эксцентриситет, ω – угол между линией узлов и периастром). Уравнения (1) являются приближёнными, так как в них входят наблюдаемые величины. В качестве неизвестных выступают элементы орбиты. Используя N наблюдений, можно составить систему $2N$ приближенных уравнений. Наиболее распространённым методом решения систем приближенных уравнений является метод наименьших квадратов.

В общем виде задачу определения орбиты двойной звезды можно сформулировать в полярной или декартовой системе координат

¹ Байдин Алексей Эдуардович – старший преподаватель, кафедра медицинской физики, Ярославская государственная медицинская академия.

E-mail: abaid@rambler.ru

$$\sum_{k=1}^N (\rho_{k(obs)} - \rho_{k(cal)})^2 + \sum_{k=1}^N \rho_{k(cal)}^2 (\theta_{k(obs)} - \theta_{k(cal)})^2 = \min, \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^N (x_{k(obs)} - x_{k(cal)})^2 + \sum_{k=1}^N (y_{k(obs)} - y_{k(cal)})^2 = \min. \quad (3)$$

Декартовы координаты связаны с полярными $x = \rho \cos \theta$ и $y = \rho \sin \theta$.

Если уравнения (1) были бы линейны относительно определяемых величин, то для нахождения минимума функции (2) достаточно решить систему семи линейных уравнений. В действительности уравнения (1) нелинейны, поэтому применяется метод дифференциальных поправок [4]. Для приращений функций (1) при постоянстве времени имеем

$$\Delta \rho_k = g_n \Delta n + g_a \Delta a + g_i \Delta i + g_{Tp} \Delta T_p + g_e \Delta e + g_\omega \Delta \omega + \varepsilon_{\rho k}, \quad (4)$$

$$\Delta \theta_k = f_n \Delta n + f_i \Delta i + f_\Omega \Delta \Omega + f_{Tp} \Delta T_p + f_e \Delta e + f_\omega \Delta \omega + \varepsilon_{\theta k}, \quad (5)$$

где $\Delta \rho_k = \rho_{k(obs)} - \rho_{k(cal)}$, $\Delta \theta_k = \theta_{k(obs)} - \theta_{k(cal)}$; Δn , Δa , Δi , $\Delta \Omega$, ΔT_p , Δe и $\Delta \omega$ – поправки к элементам орбиты, $\varepsilon_{\theta k}$, $\varepsilon_{\rho k}$ – величины, имеющие высший порядок относительно поправок. Значения $\varepsilon_{\theta k}$ и $\varepsilon_{\rho k}$ также зависят от ошибок измерений, то есть даже при вычисленных элементах орбит они будут отличны от нуля.

Ставится задача нахождения минимума выражения

$$\sum_{k=1}^N [w_{\theta k} (\rho_{k(cal)} \varepsilon_{\theta k})^2 + w_{\rho k} \varepsilon_{\rho k}^2] = \min, \quad (6)$$

где N – количество наблюдений, $w_{\theta k}$ и $w_{\rho k}$ – веса наблюдений, множитель $\rho_{k(cal)}$ поставлен для согласования единиц измерения, также он изменяет веса $\theta_{k(obs)}$.

Перед началом работы метода дифференциальных поправок необходимо задать первые приближения (n_0 , a_0 , i_0 , Ω_0 , T_{p0} , e_0 и ω_0). Далее посредством (6) определяются поправки, производится уточнение элементов орбиты $n = n_0 + \Delta n$ и т.д. После этого процесс повторяется многократно, пока поправки не станут малыми.

Метод дифференциальных поправок не является глобально сходящимся, трудности возникают при попытках определить орбиты, когда наблюдениями не охвачен полный оборот звезды-спутника [5]. Для повышения сходимости можно использовать генетические алгоритмы.

В работе рассматриваются три метода определения орбит визуально-двойных звёзд.

1. Метод, предложенный CHARA [6]. В данном методе три неизвестные (n , T_p , e) определяются подбором. Предлагается вместо подбора использовать генетический алгоритм.
2. Генетическим алгоритмом определяются все элементы орбиты (n , a , i , Ω , T_p , e , ω).
3. Генетическим алгоритмом определяется пять неизвестных (n , i , T_p , e , ω), две другие (a , Ω) линейно связаны с наблюдаемыми величинами (ρ_k , θ_k) и находятся методом наименьших квадратов.

Для проверки предлагаемых методов использовалась программа получения эталонных наблюдений. Особенности её работы: 1) задаются элементы орбиты, два крайних значения позиционного угла (θ_0 и θ_N), количество наблюдений; 2) выбирается способ распределения наблюдений на дуге, например, равномерное покрытие наблюдениями дуги или случайное, подчинённое какому-либо распределению; 3) вычисляются моменты времени, когда звезда-спутник находится в полученных точках на дуге; 4) по моментам времени и элементам орбит определяются относительные положения звезды-спутника; 5) к полученным наблюдениям добавляются ошибки, подчинённые нормальному распределению. В данной работе основное внимание было уделено максимально возможной точности, с которой можно определять элементы орбиты, используя ГА, поэтому большинство тестов проводились на точных данных (ошибки не добавлялись).

Применение генетических алгоритмов для определения орбит

Работу генетического алгоритма можно представить следующей схемой:

- 1) генерация популяции;

- 2) выбор родителей;
- 3) скрещивание (рекомбинация);
- 4) мутация;
- 5) формирование новой популяции;
- 6) проверка критерия окончания цикла.

В случае выполнения условия – вывод лучшего решения или всей совокупности решений, при невыполнении цикл повторяется, начиная с пункта (2).

Особенность генетических алгоритмов – большое количество параметров и операторов, которые влияют на точность результатов. Выбрать наиболее оптимальный алгоритм сложно, критерием точности служит стабильность получаемых результатов при повторных запусках программы.

На начальном этапе перед генерацией популяции необходимо задать интервалы возможных значений искомым величин, для четырёх неизвестных они стандартны: $i \in [0,1;89,9]$, $\Omega \in [0;179,99]$, $e \in [0,001;0,95]$, $\omega \in [0;359,99]$; для остальных (n , a , T_p) интервалы желательно задавать, анализируя имеющиеся данные. Интервалы могут быть очень большими, главное, чтобы искомые значения попадали в них. Далее задаётся размер популяции и количество поколений. Размер популяции зависит от количества неизвестных и требуемой точности результатов, чем больше неизвестных, тем больше должен быть размер популяции для получения хорошей точности. Количество поколений зависит от используемого оператора отбора в новую популяцию и процента мутирования: чем больше вероятность мутаций, тем большее количество поколений нужно задавать. На точность результатов сильно влияет характер изучаемой функции. Например, при работе с двойными звёздами на коротких дугах функция (2) может практически не изменяться вблизи минимума [5], поэтому точное определение элементов орбит методами, в основе которых лежит поиск минимума, невозможно. Также могут возникать трудности, характерные для генетических алгоритмов [7].

В качестве оператора выбора родителей использовалась панмиксия – для каждой особи пара выбирается случайно из всей популяции.

В работе применяется два вида рекомбинации:

- 1) дискретная – случайный обмен генами между родителями;
- 2) промежуточная – реализуется с помощью выражения

$$\text{Потомок} = \text{Род1} + \alpha(\text{Род2} - \text{Род1}), \quad (7)$$

где α – случайное число на отрезке $[-d;1+d]$, в работе $d = 0,5$, d может быть любым числом больше нуля, наиболее принятым является $d = 0,25$ [7], но при таком значении оператор рекомбинации с большей вероятностью будет усреднять значения.

Случайные изменения решений реализуются посредством неоднородной мутации – с одинаковой вероятностью используется одна из двух формул

$$y_i' = y_i + (\max_i - y_i) \left(1 - r^{\left(\frac{1-t}{T} \right)} \right) \quad \text{или} \quad y_i' = y_i - (y_i - \min_i) \left(1 - r^{\left(\frac{1-t}{T} \right)} \right), \quad (8)$$

где \max_i и \min_i – граничные значения величины y_i , $r \in [0;1]$ выбирается случайно, t – номер поколения, T – максимальное количество поколений.

При формировании новой популяции применяется элитарный отбор – в новую популяцию выбираются решения, дающие минимальные суммы квадратов отклонений, в соответствии с условием (2) или (3). Для более стабильной работы генетических алгоритмов желательно поддерживать генетическое разнообразие, то есть в популяции не должно быть двух одинаковых решений, поэтому дополнительным условием отбора является неравенство сумм квадратов отклонений.

Метод, предложенный CHARA

Используются моменты времени наблюдений (T_k) и декартовы координаты звезды-спутника относительно главной компоненты (x_k, y_k). Среднее движение (n), эпоха прохождения периастропа (T_p) и эксцентриситет (e) определяются подбором. Количество наблюдений $N \geq 4$.

Алгоритм метода.

1. Задаются интервалы возможных значений (n , T_p , e) и вычислительная погрешность, которая определяет размер шага при подборе. Присваиваются различные значения искомым величинам.

2. Из уравнения Кеплера [4] вычисляются эксцентрические аномалии (E_k) на моменты наблюдений (T_k).

3. Определяются приведённые координаты

$$X_k = \cos(E_k) - e, Y_k = \sqrt{1 - e^2} \sin(E_k). \quad (9)$$

4. Методом наименьших квадратов находятся элементы Тиле–Иннеса (A , B , F , G). Используются $2N$ уравнений

$$x_k = AX_k + FY_k, y_k = BX_k + GY_k. \quad (10)$$

5. Выбираются значения n , T_p и e , при которых выполняется условие (3).

6. Производится переход от элементов Тиле–Иннеса к элементам Кэмпбелла.

В данной работе для определения n , T_p и e вместо подбора используется генетический алгоритм. Эксперименты с эталонными орбитами показали, что при численности популяции $N_{pop} = 200$ и максимальном количестве поколений $T_{pop} = 100$ точность результатов определяется вычислительной погрешностью компьютера, при этом можно не использовать мутации и не заботиться о генетическом разнообразии при выборе новой популяции. При понижении численности популяции поддержание генетического разнообразия становится необходимым для получения хороших результатов. Чтобы мутации давали преимущество, необходимо согласовывать процент мутирования и численность поколений.

В качестве примера определим орбиту Кастора (α Gem). Данную двойную звезду открыли в 1719 г. Брэдлей и Пунд. Изучая Кастор и пять других ярких звёзд, Гершель в 1803 г. объяснил их относительные движения гравитационным взаимодействием, что доказывало существование двойных звёздных систем. Кастор относится к широким парам, с момента открытия по настоящее время звезда не совершила полного оборота, повернулась на 300° . Для определения орбиты использовались данные сайта обсерватории Ниццы [8], были добавлены наблюдения (1879–1925 г.) Доберка, ван Бисбрука [9] и современные четвёртого интерферометрического каталога [10], исключены измерения, дающие заметные отклонения в сравнении с основной совокупностью данных: POK 1933.142, T 1938.260, FAT 1945.23, FLE 1955.223, MLR 1967.89, SLE 2004.185. Орбита вычислялась по 431 наблюдению на дуге 200° , веса не задавались, правило 3σ не применялось (в ГА правило 3σ можно включить на определённом поколении, исключение или возвращение данных вести в соответствии с лучшим решением). Позиционные углы приведены к эпохе $T_0 = 2000$.

Параметры генетического алгоритма: размер популяции $N_{pop} = 200$, количество поколений $T_{pop} = 100$, процент мутирования гена 10 %. Элементы орбиты представлены в табл. 1. В каждой ячейке отмечена величина (Δ_x), характеризующая вычислительную погрешность ГА, она равна среднеквадратичному отклонению, вычисленному по результатам пятнадцати запусков алгоритма. В процессе работы программы было получено три результата, отличающихся от представленного. Появление различных решений можно объяснить тем, что наблюдениями не охвачен полный оборот звезды-спутника. Для сравнения представлен результат, полученный методом дифференциальных поправок в полярных координатах (д.п.п.к.), в нижней строке даны элементы орбиты из шестого каталога орбит [11].

Таблица 1

Элементы орбиты Кастора

	P , год	a , "	i , °	Ω , °	T_p , год	e	ω , °
ГА	451,6	6,62	114,95	41,5	1959,85	0,331	252,6
Δ_x	8×10^{-6}	7×10^{-8}	8×10^{-8}	2×10^{-7}	7×10^{-7}	8×10^{-9}	10^{-6}
д.п.п.к.	451,6	6,62	114,95	41,5	1959,84	0,331	252,6
6 cat	466,8	6,78	113,56	41,2	1957,3	0,333	249,3

На рис. 1 изображены наблюдения и видимая траектория звезды-спутника относительно главной компоненты, она построена по вычисленным с помощью ГА элементам орбиты. Крести-

ком отмечено положение главной звезды, тонкая линия – линия узлов (пересечение картинной плоскости с плоскостью истинной орбиты).

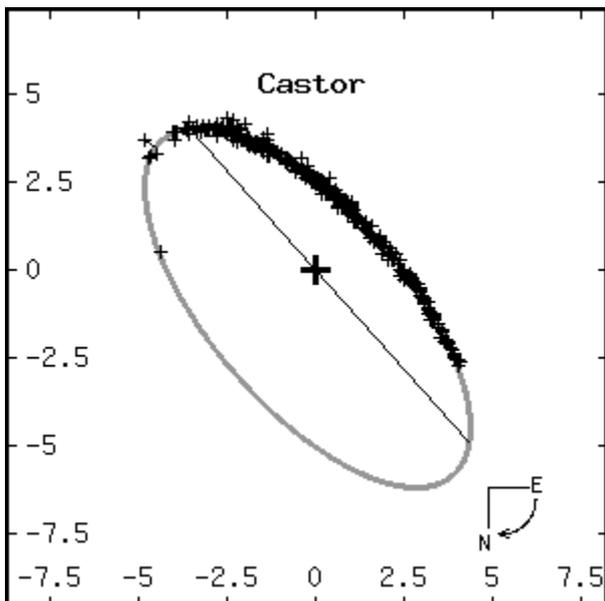


Рис. 1. Кастор. WDS 07346+3153

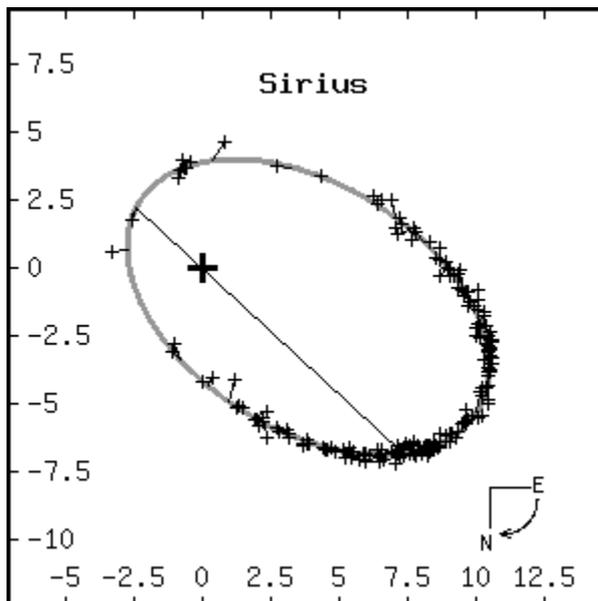


Рис. 2. Сириус. WDS 06451-1643

Методы, работающие с полярными координатами

Используются следующие формулы:

$$E_k - e \sin E_k - n(T_k - T_p) = 0, \tag{11}$$

$$\operatorname{tg} \frac{v_k}{2} = \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \operatorname{tg} \frac{E_k}{2}, \tag{12}$$

$$\operatorname{tg}(\theta_k - \Omega) = \operatorname{tg}(v_k + \omega) \cos i, \tag{13}$$

$$\rho_k = a(1 - e \cos E_k) \frac{\cos(v_k + \omega)}{\cos(\theta_k - \Omega)}, \tag{14}$$

где E_k – эксцентрическая аномалия, v_k – истинная аномалия.

Метод, в котором все элементы орбиты определяются с помощью генетических алгоритмов.

Рассматривается популяция решений $(n_j, a_j, i_j, \Omega_j, T_{pj}, e_j, \omega_j)$.

1. С помощью операторов «рекомбинация» и «мутация» создается новое поколение.

2. Для каждого решения из выражений (11)–(14) вычисляются относительные координаты звезды-спутника $(\theta_{k(cal)}, \rho_{k(cal)})$.

3. Производится формирование новой популяции. Выбираются решения, удовлетворяющие выражению (2).

Пункты 1–3 повторяются, критерием окончания цикла служит количество поколений. Эксперименты с эталонными данными показали, что без обеспечения генетического разнообразия точность результатов является низкой, поэтому при формировании новой популяции были наложены дополнительные условия. В первых поколениях отбор должен быть таким, чтобы обеспечить максимально возможное генетическое разнообразие, что повышает вероятность обнаружения глобального минимума. С каждым новым поколением решения всё лучше удовлетворяют наблюдениям, генетическое разнообразие при этом уменьшается, что должно отражаться в условии отбора. Высокие требования к генетическому разнообразию приводят к неэффективности процессов рекомбинации, низкие – к преждевременной сходимости, в случае одинаковых решений процессы рекомбинации также становятся неэффективными.

При формировании новых поколений использовалось условие: разность сумм квадратов индивидуальных отклонений двух ближайших решений в популяции должна быть больше некоторой величины

$$F_{j+1} - F_j > gF_1, \quad (15)$$

где F_j – функция (2) для j -ого решения в популяции (в каждом поколении производится сортировка решений по возрастанию F), g – некоторая функция номера поколения, в случае с эталонными точными данными можно использовать константу для обработки наблюдений $g = k\left(1 - \frac{t}{T}\right)$, k – константа, t – номер поколения, T – максимальное количество поколений.

Алгоритм метода с пятью неизвестными отличается тем, что a_j и Ω_j определяются из уравнений (13, 14) методом наименьших квадратов. Стабильность работы ГА при этом повышается, хорошей точности можно добиться без обеспечения генетического разнообразия.

В качестве примера определим орбиту Сириуса (α CMa). Звезда-спутник (α CMa B) была открыта Алваном Кларком 31 января 1862 г. при испытании нового 18,5-дюймового телескопа. Дальнейшие исследования спутника показали, что он принадлежит к новому классу астрономических объектов – Сириус B является первым из обнаруженных белых карликов и одним из самых массивных среди известных.

Использовались данные сайта обсерватории Ниццы [8], были добавлены наблюдения (1863–1923 г.) О. Струве, Холла, Бернхема, Эйткена, ван Бисбрука [9] и современные четвёртого интерферометрического каталога [10]. Из вычислений исключено измерение OL 1932.133 и два неполных измерения WAM и HEI. Для определения орбиты использовалось 179 наблюдений.

Параметры ГА для метода с семью неизвестными: размер популяции $N_{pop} = 300$, количество поколений $T_{pop} = 300$, процент мутирования гена 1%, коэффициент, обеспечивающий генетическое разнообразие $k = 0,0001$; метод, в котором с помощью ГА определяются пять элементов орбиты: $N_{pop} = 500$, $T_{pop} = 100$, процент мутирования гена 5%. Элементы орбиты Сириуса и величины, характеризующие стабильность работы ГА, представлены в табл. 2. На рис. 2 построена видимая орбита Сириуса с использованием результатов метода с семью неизвестными.

Таблица 2

Элементы орбиты Сириуса							
	P , год	a , "	i , °	Ω , °	T_p , год	e	ω , °
7 неизв.	50,108	7,520	135,57	47,11	1894,185	0,5846	149,94
Δ_x	0,001	0,001	0,02	0,02	0,003	0,0001	0,03
5 неизв.	50,108	7,523	135,57	47,12	1894,184	0,5846	149,94
Δ_x	6×10^{-5}	4×10^{-5}	5×10^{-4}	10^{-3}	2×10^{-4}	2×10^{-6}	2×10^{-3}
6 cat	50,090	7,500	136,53	44,57	1894,130	0,5923	147,27

Для сравнения орбита Сириуса также была определена методом CHARA. Параметры ГА: численность популяции $N_{pop} = 100$, количество поколений $T_{pop} = 100$, процент мутирования гена 10%.

Таблица 3

Элементы орбиты Сириуса. Метод CHARA							
	P , год	a , "	i , °	Ω , °	T_p , год	e	ω , °
ГА	50,108	7,518	135,64	47,06	1894,185	0,5850	149,90
Δ_x	5×10^{-6}	10^{-7}	2×10^{-6}	2×10^{-5}	5×10^{-6}	10^{-7}	3×10^{-5}

Возможные сферы применения описанных методов

Основное преимущество рассмотренных в работе методов – отсутствие жестких требований к первым приближениям (интервалы изменения искомым величин могут быть велики). Если наблюдениями охвачено около оборота или более, трудности с первыми приближениями и сходимостью метода дифференциальных поправок возникают редко, поэтому применение ГА рассматривается как один из вариантов, преимущество – не нужно вычислять первые приближения, недостаток – более длительное время работы.

Ситуация на дугах менее оборота резко меняется. Если наблюдениями охвачена дуга $\sim 180^\circ$, или наблюдения, произведённые на нескольких оборотах, покрывают только часть дуги в силу вытянутости орбиты и малого разделения, то незначительные отклонения в первых приближениях способны нарушить сходимость метода дифференциальных поправок. Геометрический метод

и метод Докобо [12], используемые для определения первых приближений, в силу особенностей формул, лежащих в их основе, на дугах $\sim 180^\circ$ могут давать значительные погрешности [13]. В этих случаях описанные в работе алгоритмы имеют преимущества, так как позволяют определять орбиты с точностью метода дифференциальных поправок и не требуют вычисления первых приближений. В качестве примера рассмотрим изучаемую в данной работе звезду Кастор. Метод дифференциальных поправок перестаёт сходиться при использовании элементов орбиты шестого каталога в качестве первого приближения, если одновременно произвести операции: $i+10^\circ$ и $e-0,2$ или $\Omega+20^\circ$ и $\omega+20$. Следует отметить, что Кастор является широкой парой, удобной для измерений и хорошо изученной. Для других объектов, у которых наблюдениями охвачено $\sim 180^\circ$, требования к точности первых приближений гораздо выше, а получить хорошие первые приближения сложнее.

Рассмотренные в работе методы позволяют определять орбиты по малым дугам $\sim 50^\circ$ и менее, если используются наблюдения, полученные на современных точных инструментах. Метод дифференциальных поправок плохо работает на дугах длиной несколько десятков градусов, так как имеет малую область сходимости. Для тестирования методов было выбрано 14 звёзд, у которых накоплены многочисленные ряды наблюдений звёздным интерферометром с длинной базой Palomar Testbed Interferometer (PTI) на дугах от 25° до 180° . Астрометрическая точность инструмента имеет порядок $10^{-4}''$ [14]. Орбиты определялись только по данным PTI из каталога [10] версии 08.2014. Изучаемые звёзды длительно наблюдались спекл-интерферометрическими методами, поэтому в шестом каталоге [11] имеются надёжно определённые орбиты. Они использовались для проверки получаемых результатов с помощью ГА. Обнаружено, что половину орбит (WDS 04357+1010, 06041+2316, 15278+2906, 15416+1940, 17217+3958, 21145+1000, 21446+2539) можно определить методом дифференциальных поправок, если в качестве первого приближения брать данные шестого каталога. Если для этой цели применять элементы орбит других исследователей из файла Master file [11], сходимость довольно часто нарушается. Например, элементы орбиты WDS 04357+1010, полученные Балегой (Bag1999b), обеспечивают сходимость, а Харткопфом (Hrt2000a) и Олевичем (Ole2000a) – нет. К неожиданным результатам можно отнести определение орбиты WDS 15278+2906 методом дифференциальных поправок по дуге 25° . Для WDS 15416+1940 при использовании всей совокупности данных PTI сходимость отсутствует, положение меняется после исключения наблюдения Mut 2008.5236. Остальные семь звёзд (WDS 02157+2503, 02537+3820, 15232+3017, 18570+3254, 20375+1436, 21148+3803, 21501+1717) определялись с помощью ГА, метод дифференциальных поправок не сходится.

Таблица 4

Элементы орбиты WDS 02157+2503

	P , год	a , "	i , $^\circ$	Ω , $^\circ$	T_p , год	e	ω , $^\circ$
CHARA ГА	23,594	0,2403	104,231	55,019	1986,154	0,70488	264,542
Δ_x	2,489	0,0127	0,205	0,817	2,486	0,01055	3,833
6 cat	23,608	0,2347	104,437	55,823	1986,182	0,68119	263,927

В качестве примера рассмотрим орбиту WDS 02157+2503, вычисленную по 89 наблюдениям звёздного интерферометра PTI на дуге 40° . При использовании элементов орбит шестого каталога [11] в качестве первого приближения у метода дифференциальных поправок сходимость отсутствует. Орбита определялась методом CHARA ГА с параметрами: $N_{pop} = 200$, $T_{pop} = 100$, процент мутирования гена 10 %. Результаты и данные шестого каталога приведены в табл. 4. Элементы орбиты шестого каталога, безусловно, точнее, они вычислены по всей совокупности данных, но сама возможность определения орбиты по короткой дуге открывает большие перспективы, так как известно множество широких пар с медленным вращением, у которых за столетия наблюдений звезда-спутник поворачивается только на десятки градусов.

Заключение

В работе рассмотрены три метода определения орбит визуально-двойных звёзд с помощью генетических алгоритмов. Эксперименты с эталонными данными показали, что при увеличении численности популяции и количества поколений повышается стабильность работы методов и возрастает точность определяемых элементов орбит. Это ожидаемый результат в силу стохастической природы ГА. Наиболее удобен в использовании метод программы CHARA: обеспечивает высокую точность, время вычислений невелико – в случае обработки 50-ти наблюдений порядка

минуты. При увеличении количества наблюдений время работы программы возрастает, так как основные вычислительные затраты связаны с определением сумм квадратов индивидуальных отклонений. У методов, работающих с полярными координатами, для обеспечения стабильности получаемых результатов увеличена численность популяции и количество поколений, что привело к увеличению вычислительных затрат. В методе с семью неизвестными использовался алгоритм, обеспечивающий генетическое разнообразие.

В качестве примера описанными в работе методами определены орбиты Кастора и Сириуса. Полученные результаты близки к представленным в шестом каталоге орбит.

Литература

1. Michalewicz, Z. Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs / Z. Michalewicz. – Berlin: Springer, 1996. – 388 p.
2. The HARPS search for southern extra-solar planets. VIII. μ Arae, a system with four planets / F. Pepe, A.C.M. Correia, M. Mayor *et al.* // *Astronomy & Astrophysics*. – 2007. – Vol. 462. – P. 769–776.
3. Теоретические методы локализации в пространстве-времени неоткрытых небесных тел: монография (Посвящается 100-летию со дня рождения В.В. Радзиевского) / Н.И. Перов и др.; под ред. Н.И. Перова. – Ярославль: Изд-во ЯГПУ, 2011. – 203 с.
4. Куто, П. Наблюдения визуально-двойных звёзд / П. Куто. – М.: Мир, 1981. – 238 с.
5. Байдин, А.Э. Особенности определения орбит визуально-двойных звёзд на основе наблюдений коротких дуг видимого движения / А.Э. Байдин // *Ярославский педагогический вестник. Том III (Естественные науки)*. – 2010. – № 4. – С. 32–39.
6. Hartkopf, W.I. Binary star orbits from speckle interferometry. II. Combined visual/speckle orbits of 28 close systems. / W.I. Hartkopf, H.A. McAlister, O.G. Franz // *Astron. J.* – 1989. – Vol. 98. – P. 1014–1039.
7. Панченко, Т.В. Генетические алгоритмы / Т.В. Панченко; под ред. Ю.Ю. Тарасевича. – Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2007. – 87 с.
8. <http://sidonie.obs-nice.fr/scripts/SidonieWelcome.asp>
9. <http://adswwww.harvard.edu>
10. Fourth Catalog of Interferometric Measurements of Binary Stars / W.I. Hartkopf, B.D. Mason, G.L. Wycoff, H.A. McAlister. – Washington: U.S. Nav. Obs., <http://ad.usno.navy.mil/wds/int4.html>.
11. Hartkopf, W.I. Sixth Catalog of Orbits of Visual Binary Stars / W.I. Hartkopf, B.D. Mason. – Washington: U.S. Nav. Obs., <http://ad.usno.navy.mil/wds/orb6.html>.
12. Docobo, J.A. On the analytic calculation of visual double star orbits / J.A. Docobo // *Celestial Mechanics*. – 1985. – Vol. 36. – P. 143–153.
13. Байдин, А.Э. Анализ классических методов определения орбит визуально-двойных звёзд / А.Э. Байдин // *Ярославский педагогический вестник. Том III (Естественные науки)*. – 2011. – № 4. – С. 71–75.
14. Lane, B.F. Differential astrometry of subarcsecond scale binaries at the Palomar Testbed Interferometer / B.F. Lane, M.W. Muterspaugh // *The Astrophysical Journal*. – 2004. – Vol. 601. – P. 1129–1135.

Поступила в редакцию 18 июня 2013 г.

**DETERMINATION OF VISUAL DOUBLE STAR ORBITS
BY MEANS OF GENETIC ALGORITHMS**A.E. Baidin¹

Based on genetic algorithms (GA), three methods are proposed for the calculation of visual double star orbits: 1) the program developed by CHARA; 2) seven orbital parameters are determined by means of GA; 3) the least-square method is used for the calculation of the major semi-axis and the longitude of the ascending node, the rest five unknown quantities are found by GA. The methods are tested on model data. Two programming languages, Pascal and PHP, are used. The methods are applied to the bright stars Castor and Sirius.

Keywords: visual double stars; orbits; methods; data analysis; genetic algorithms.

References

1. Michalewicz Z. *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Berlin: Springer, 1996. 388 p.
2. Pepe F., Correia A.C.M., Mayor M., Tamuz O., Couetdic J., Benz W., Bertaux J.-L., Bouchy F., Laskar J., Lovis C., Naef D., Queloz D., Santos N.C., Sivan J.-P., Sosnowska D., Udry S The HARPS search for southern extra-solar planets. VIII. μ Arae, a system with four planets. *Astronomy & Astrophysics*. 2007. Vol. 462. pp. 769–776.
3. Perov N.I. *Teoreticheskie metody lokalizatsii v prostranstve-vremeni neotkrytykh nebesnykh tel: kollektivnaya monografiya: (posvyashchaetsya 100-letiyu so dnya rozhdeniya V. V. Radzievskogo)* (Theoretical methods of localization in space-time undiscovered celestial bodies: collective monograph: (dedicated to the 100th anniversary of the birth of Vladimir Radzievskii)). Yaroslavl', YaGPU Publ., 2011. 203 p. (in Russ.).
4. Kuto P. *Nablyudeniya vizual'no-dvoynykh zvyezd* (Observations of visual double stars). Moscow, Mir Publ., 1981. 238 p. (in Russ.).
5. Baidin A.E. *Yaroslavskiy pedagogicheskiy vestnik. Tom III (Estestvennye nauki)*. 2010. no. 4. pp. 32–39. (in Russ.).
6. 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. pp. 1014–1039.
7. Panchenko T.V. *Geneticheskie algoritmy* (Genetic algorithms). Astrakhan', Izdatel'skiy dom «As-trakhanskiy universitet» Publ., 2007. 87 p. (in Russ.).
8. <http://sidonie.obs-nice.fr/scripts/SidonieWelcome.asp>
9. <http://adswwww.harvard.edu>
10. Hartkopf W.I., Mason B.D., Wycoff G.L., McAlister H.A. *Fourth Catalog of Interferometric Measurements of Binary Stars*. Washington, U.S. Nav. Obs., <http://ad.usno.navy.mil/wds/int4.html>.
11. Hartkopf W.I., Mason B.D. *Sixth Catalog of Orbits of Visual Binary Stars*. Washington, U.S. Nav. Obs., <http://ad.usno.navy.mil/wds/orb6.html>.
12. Docobo J.A. On the analytic calculation of visual double star orbits. *Celestial Mechanics*. 1985. Vol. 36. pp. 143–153.
13. Baidin A.E. *Yaroslavskiy pedagogicheskiy vestnik. Tom III (Estestvennye nauki)*. 2011. no. 4. pp. 71–75.
14. Lane B.F., Muterspaugh M.W. Differential astrometry of subarcsecond scale binaries at the Palomar Testbed Interferometer. *The Astrophysical Journal*. 2004. Vol. 601. pp. 1129–1135.

Received 18 June 2013

¹ Baidin Alexey Eduardovich is Senior Lecturer, Department of Medical Physics, Yaroslavl State Medical Academy.
E-mail: abaid@rambler.ru