

На правах рукописи

Байдин Алексей Эдуардович

**Исследование методов определения орбит и точности наблюдений
визуально-двойных звезд**

01.03.01 – астрометрия и небесная механика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Ярославль – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования “Ярославский государственный педагогический университет им. К.Д. Ушинского”

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук, доцент

Перов Николай Иванович

Официальные оппоненты:

Холшевников Константин Владиславович

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой небесной механики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования “Санкт-Петербургский государственный университет”, г. Санкт-Петербург

Кияева Ольга Вениаминовна

кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки “Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук”, г. Санкт-Петербург

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина”, г. Екатеринбург

Защита состоится 15 июня 2018 года в 11 час. 15 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.120.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки “Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук” по адресу: 196140, г. Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, дом 65, корпус 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАО РАН и на сайте ГАО РАН (www.gaoran.ru).

Автореферат разослан «___» _____ 2018 года

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н.

Булига Станислава Дмитриевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время вся информация о характеристиках звезд структурирована. Имеется большое количество каталогов. Современные каталоги, непосредственно связанные с темой диссертации, следующие: Вашингтонский каталог визуально-двойных звезд (WDS) [1], шестой каталог орбит визуально-двойных звезд [2], четвертый интерферометрический каталог двойных звезд [3], каталог двойных звезд Tycho [4], каталог Hipparcos [5, 6]. Первые три каталога постоянно обновляются. На протяжении последних четырех лет осуществляется космическая миссия Gaia [7], наблюдательные данные которой также будут способствовать развитию научных областей, близких к теме диссертации.

В связи с развитием вычислительной техники многие методы определения орбит визуально-двойных звезд прошлого столетия начинают терять актуальность, поэтому необходимо изучить известные на данный момент методы, проанализировать их достоинства и недостатки.

Наблюдения визуально-двойных звезд ведутся более двухсот лет. За это время было разработано множество различных методов наблюдений: визуальные, фотографические, спекл-интерферометрические, ПЗС, интерферометрия с длинными базами и т.д. Для более точного определения орбит необходимо присваивать веса наблюдениям, то есть иметь определенные представления о точности различных методик наблюдений. Задачу выбора весов трудно решить математически строго, по настоящее время не имеется общепринятой методики определения веса. Наиболее известная формула для весов наблюдений представлена в работе [8].

В Вашингтонском каталоге визуально-двойных звезд содержится информация более чем о 110000 визуально-двойных звезд, в шестом каталоге орбит представлены элементы орбит менее чем 3000 объектов. Основная причина, по которой орбиты большинства звезд не определены – низкая точность наблюдений и малая дуга, охваченная наблюдениями. В каталоге WDS имеется множество звезд с неопределенными орбитами, изучаемых более ста лет, у которых

наблюдениями охвачены дуги $20^\circ - 50^\circ$. В основном наблюдения выполнены визуально с помощью микрометров, относительные погрешности $\Delta\rho/\rho \sim 10^{-1} - 10^{-2}$. Численные эксперименты показывают, что получить достаточно надежные результаты на дугах $20^\circ - 50^\circ$ можно только при $\Delta\rho/\rho \sim 10^{-3} - 10^{-4}$, кроме того, у большинства методов при работе на малых дугах возникают проблемы со сходимостью. Перспективным направлением является разработка глобально сходящихся методов определения предварительных орбит. В диссертации изучались и развивались динамические методы и методы, использующие генетические алгоритмы [9].

Для определения орбит визуально-двойных звезд по наблюдениям на малых дугах А.А. Киселевым и О.В. Кияевой был разработан метод параметров видимого движения (ПВД) [10, 11]. Он является динамическим, использует дополнительные данные: суммы масс компонентов и относительные лучевые скорости. Для определения параметров видимого движения применяется разложение в ряд относительных координат по времени. Ряды являются приближенными выражениями, точные значения производных координат по времени они дают, если дуга, охваченная наблюдениями, $\Delta\theta \rightarrow 0^\circ$. С другой стороны ошибки наблюдений при $\Delta\theta \rightarrow 0^\circ$ устремляют погрешности определяемых величин к бесконечности. По этой причине для каждого значения относительной погрешности $\Delta\rho/\rho$ имеется оптимальная для проведения исследований длина дуги. Определение условий, при которых метод ПВД дает наиболее точные результаты, является актуальной задачей.

К актуальным задачам, которые находятся на грани современной точности наблюдений относительных положений, также стоит отнести определение невидимых спутников в двойных системах, изучение возмущений тесных пар, связанных с приливной и вращательной деформациями, и изучение возмущений в тройных звездных системах.

Цель диссертационной работы

Целью работы является исследование относительных движений двойных и кратных звезд. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Проанализировать известные методы определения орбит, написать компьютерные программы для обработки наблюдений.
2. Разработать новые методы определения орбит.
3. Для выбора весов определить погрешности наиболее распространенных техник наблюдений двойных звезд.
4. Исследовать особенности работы метода параметров видимого движения (ПВД).

Научная новизна

Новизна представленной научной работы заключается в следующем:

1. Впервые определены орбиты 17 визуально-двойных звезд по наблюдениям на коротких дугах.
2. Усовершенствован метод Харткопфа и др. [12]: три величины (n , T_p , e), определяемые подбором, предложено определять с помощью генетических алгоритмов, это значительно сократило время вычислений и повысило их точность; в генетическом алгоритме при выборе новой популяции введены дополнительные условия на значения суммы масс и относительной лучевой скорости, это позволило применить метод для определения орбит по коротким дугам.
3. Впервые реализован алгоритм определения орбиты, основным уравнением в котором является закон площадей. Ранее определение орбиты визуально-двойной звезды начиналось с графического построения видимого эллипса, наилучшим образом удовлетворяющего закону площадей. В нашей работе сделана попытка применить закон площадей для определения орбиты, используя возможности современной вычислительной техники.
4. Определены диапазоны длин дуг, охваченных наблюдениями с заданной точностью, при которых метод ПВД работает эффективно. Проанализированы различные алгоритмы вычисления параметров видимого движения.

5. Разработано несколько модификаций метода ПВД (в настоящее время в силу причин, раскрытых в диссертации, только одну из них можно использовать на практике для определения орбит).
6. Предложены методы изучения точности наблюдений визуально-двойных звезд.

Практическая значимость

В работе впервые вычислены предварительные орбиты 17 звезд, разработаны новые методы определения орбит. Предварительные орбиты нужны наблюдателям для планирования наблюдений звезд. Модифицированный в диссертации метод Харткопфа и др. очень удобен в использовании: не требует первых приближений, является глобально сходящимся, при введении дополнительных условий на значения сумм масс и относительных лучевых скоростей позволяет определять орбиты по коротким дугам. Данный метод могут использовать специалисты ГАО РАН, УрФУ, ТГУ, ИПА РАН, интересующиеся динамикой двойных и кратных звезд. Остальные методы, разработанные в диссертации, менее универсальны, но они также могут быть полезны, например, для оценки надежности определяемых элементов орбит можно сравнить результаты, получаемые различными методами. Результаты численных экспериментов, проведенных с методом ПВД, могут быть полезны специалистам из ГАО РАН.

В настоящее время полученные в работе орбиты планируется использовать в Пулковской обсерватории для статистического исследования ориентации плоскостей орбит в галактической системе координат.

Положения, выносимые на защиту:

1. методы определения орбит: модифицированный метод Харткопфа и др., модифицированный метод ПВД, метод, в основе которого лежит закон площадей;
2. орбиты визуально-двойных звезд, определенные в ходе выполнения исследования (орбиты 17 звезд были определены впервые);
3. результаты численных экспериментов, проводимых с методом ПВД;

4. методы изучения точности наблюдений визуально двойных звезд, среднеквадратичные погрешности наблюдений отдельно взятых инструментов.

Степень достоверности и апробация работы

Полученные в данной работе результаты имеют необходимую достоверность и обоснованность, что подтверждается следующими положениями.

- Работа методов определения орбит тестировалась на модельных наблюдениях, кроме того, обрабатывались наблюдения хорошо изученных двойных звезд, проводилось сравнение результатов, полученных в диссертации, с результатами других исследователей.
- Орбиты, определенные по коротким дугам, являются предварительными. В силу медленного орбитального движения эфемериды, полученные по предварительным орбитам, в большинстве случаев будут достаточно хорошо согласовываться с наблюдениями ближайшие десятки или сотни лет.
- Анализ метода ПВД проводился с использованием большого количества модельных данных, в ходе исследования изменялись длины дуг и погрешности, вносимые в наблюдения, генерировались различные элементы орбит. Методы изучения точности наблюдений также были протестированы на большом количестве модельных орбит.

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях:

1. Восьмом съезде Астрономического Общества и Международного симпозиума “Астрономия – 2005: состояние и перспективы развития”, ГАИШ МГУ, 30 мая – 6 июня, 2005.
2. Всероссийской астрономической конференции: “Тесные двойные звезды в современной астрофизике”, ГАИШ МГУ, 22-24 мая, 2006.
3. Международном конгрессе “Нелинейный динамический анализ – 2007” (посвящен 150-летию со дня рождения академика А.М. Ляпунова), СПбГУ, 4-8 июня, 2007.

4. Международной научной конференции “Астрономия и астрофизика начала XXI века”, ГАИШ МГУ, 1-5 июля, 2008.
5. Всероссийской астрономической конференции (ВАК-2010) “От эпохи Галилея до наших дней”, САО РАН, 13-18 сентября, 2010.
6. Научной конференции “Астрономия в эпоху информационного взрыва: результаты и проблемы”, ГАИШ МГУ, 28 мая – 1 июня, 2012.
7. V Пулковской молодежной астрономической конференции, ГАО РАН, 9-11 июня, 2014.
8. Научной конференции “Астрономия от ближнего космоса до космологических далей”, ГАИШ МГУ, 25-30 мая, 2015.

Личный вклад автора

Личный вклад автора заключается в разработке методов определения орбит визуально-двойных звезд, написании программ для обработки наблюдений, написании статей, интерпретации полученных результатов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы (108 наименований) и приложения, содержит 31 рисунок и 65 таблиц. Общий объем работы составляет 156 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение содержит основные цели диссертационной работы, обоснование ее актуальности, научной новизны и практической значимости. Приведены положения, выносимые на защиту, кратко рассмотрена структура диссертации.

Глава I посвящена классическим методам определения орбит.

В *разделе 1.1* представлены основные формулы кинематики и динамики двойных звезд.

В *разделе 1.2* рассмотрены алгоритмы наиболее известных методов определения орбит [12-15]: геометрический метод, метод Тиле-Иннеса-ван ден Боса, Данжона, Докобо, Паласиоса, дифференциальных поправок по позиционному углу и разделению, дифференциальных поправок по декартовым координатам, метод, предложенный Харткопфом и др. Анализ методов показал, что наиболее

точными являются методы дифференциальных поправок в полярных и декартовых координатах и метод Харткопфа и др. У остальных методов имеются недостатки: 1) используются не все наблюдения или часть наблюдений используется для определения не всех искомым величин; 2) ищутся элементы орбит, наилучшим образом удовлетворяющие уравнениям, а не наблюдениям; 3) используются уравнения, содержащие несколько измеряемых величин (время считается точной величиной, данный недостаток имеет уравнение кривой второго порядка и уравнение Тиле); 4) при выводе формул для исключения неизвестных используются приближенные равенства. В работе показано, что в перечисленных случаях неконтролируемо изменяются веса наблюдений, поэтому получаемые элементы орбиты не дают минимальных значений среднеквадратичных отклонений.

Раздел 1.3 посвящен методу определения орбит, в основе которого лежит закон площадей. Преимущества метода: в качестве первого приближения используется круговая орбита в картинной плоскости, имеется возможность определения гиперболической орбиты. Недостатки: плохая сходимость, значительные вычислительные затраты. Последнее связано с тем, что площадь, описываемая проекцией радиус-вектора, определяется с помощью численных методов. Данный метод не очень удобен в использовании, а результаты по точности близки к результатам, получаемым методом дифференциальных поправок по позиционному углу.

В *разделе 1.4* рассмотрены три новых метода определения орбит визуально-двойных звезд с помощью генетических алгоритмов: 1) усовершенствованный метод Харткопфа и др., в котором для определения трех неизвестных (n , T_p , e) вместо подбора применяется генетический алгоритм; 2) метод, использующий генетический алгоритм для определения всех элементов орбиты (n , a , i , Ω , T_p , e , ω); 3) метод, в котором 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.

Эксперименты с модельными данными показали, что ошибки, обусловленные статистической природой генетических алгоритмов, при увеличении численности популяции и количества поколений можно сделать сколь угодно малыми. Наиболее удобен в использовании модифицированный метод Харткопфа и др. Достоинства метода: в качестве первых приближений использует стандартные для всех звезд интервалы изменения искомых величин, является глобально сходящимся, обеспечивает высокую точность получаемых результатов. Недостаток, связанный с большими вычислительными затратами в сравнении с методом дифференциальных поправок, при исследовании отдельных звезд не вызывает больших трудностей, так как время, необходимое для определения орбиты, в зависимости от количества обрабатываемых наблюдений лежит в диапазоне от нескольких секунд до десяти минут.

Глава II посвящена методам определения орбит по коротким дугам.

В *разделе 2.1* рассмотрены трудности, с которыми сталкиваются классические методы при определении орбит по коротким дугам. Доказано, что на дугах $20^\circ - 50^\circ$ получить достаточно надежные элементы орбит классическими методами можно только при относительных погрешностях $\Delta\rho/\rho \sim 10^{-3} - 10^{-4}$.

В *разделе 2.2* рассмотрен алгоритм метода ПВД [10, 11].

В *разделе 2.3* предложен динамический метод определения круговой орбиты. Ранее подобный алгоритм уже применялся, но для решения других задач [16]. Преимущества рассмотренного метода: не требуются значения суммы масс компонентов и относительной лучевой скорости.

В *разделе 2.4* рассмотрены модификации метода ПВД. Наиболее удачным оказался метод, использующий относительную лучевую скорость и совокупность “старых” удаленных наблюдений, с его помощью определены орбиты ADS 48, 11632, 14636. Преимущества метода: для определения орбиты не требуются вторые производные относительных координат по времени и сумма масс компонентов.

В разделе 2.5 рассмотрены модификации метода ПВД. Все методы требуют современных высокоточных данных, поэтому их применение на практике затруднительно.

В разделе 2.6 рассмотрен алгоритм определения ошибок элементов орбит, полученных методом ПВД и его модификациями. В основе алгоритма лежит подход, предложенный Киселевым [17], связанный с варьированием величин.

В разделе 2.7 производится дальнейшая доработка метода Харткопфа и др. С помощью дополнительных данных (сумм масс и относительных лучевых скоростей) было изменено условие отбора в новую популяцию. В результате точность элементов орбит, вычисляемых по наблюдениям на коротких дугах, возросла. Разработанный метод был применен для определения орбит STT 28, 75, 81, 119, 132, 182, 201, 228, 241, 250, 296, 306, 369, 383, 424, 430, 520. Орбиты всех перечисленных звезд вычислены впервые. Для повышения точности получаемых результатов использовалась только сумма масс, оцененная по фотометрическим данным, так как значения относительных лучевых скоростей в электронных базах данных отсутствуют. У звезд STT 81 и 306 не удалось надежно оценить массы, поэтому их орбиты определены без учета дополнительных данных при отборе в новую популяцию. Для проверки работы метода использовалась звезда STT 547, у этой звезды накоплен довольно продолжительный ряд фотографических наблюдений, измерена относительная лучевая скорость, по спектральным классам компонентов можно достаточно точно оценить массу.

Таблица 1. Элементы орбит							
STT	P , год	a , "	i , °	Ω , °	T_p , год	e	ω , °
28	870 ± 34	0.877 ± 0.024	124.8 ± 0.7	136.1 ± 0.3	1758.4 ± 2.4	0.382 ± 0.005	86.1 ± 3.9
250	1055 ± 320	0.652 ± 0.131	73.6 ± 1.8	174.9 ± 1.5	2059.4 ± 1.0	0.770 ± 0.010	270.3 ± 8.2

В качестве примера рассмотрим результаты обработки звезд STT 28 и 250. В табл. 1 представлены элементы орбит, в табл. 2 – информация, доказывающая, что исследуемые звезды являются физическими парами, на рис. 1 – орбиты и используемые для их вычисления наблюдения. Кроме элементов орбит в

табл. 1 представлены величины, характеризующие стабильность работы генетического алгоритма.

Таблица 2. Информация, используемая для доказательства физической связи компонентов двойной звезды								
STT	$\mu_{pm},$ $10^{-3}''/\Gamma$	$\sigma_{pm},$ $10^{-3}''/\Gamma$	$\mu_{rm},$ $10^{-3}''/\Gamma$	$\sigma_{rm},$ $10^{-3}''/\Gamma$	ВЫВОД 1	$S_{(p)lin}, ''$	$S_{(p)el}, ''$	ВЫВОД 2
28	46.44	0.92	3.34	0.26	phys	0.1212	0.1048	phys
250	3.54	1.10	2.35	0.09	?	0.1000	0.0647	phys

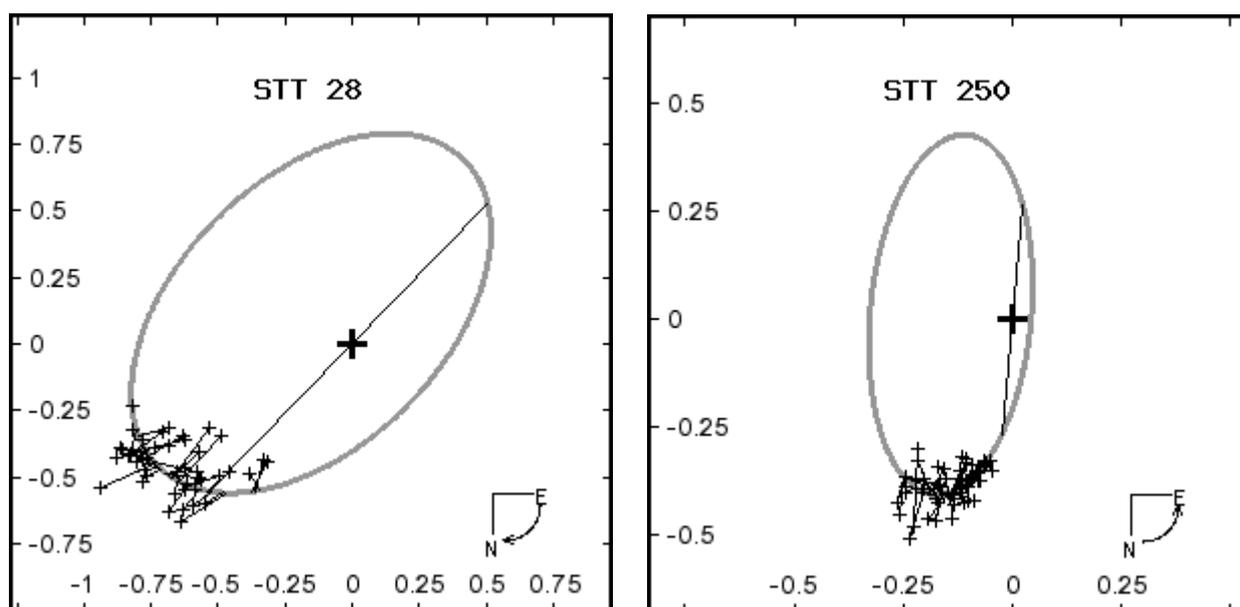


Рис. 1. Орбиты и наблюдения

При проведении исследований с наблюдениями на коротких дугах довольно часто приходится сталкиваться с оптическими парами. Наблюдения в этом случае хорошо согласуются как с моделью эллиптического движения, так и с моделью прямолинейного, поэтому современными методами можно получить элементы эллиптической орбиты оптической пары. Для исключения подобных ошибочных результатов были сформулированы два условия, которые использовались для доказательства физической связи компонентов двойной звезды: 1) $\mu_{pm} > 5\mu_{rm}$, μ_{pm} – собственное движение, μ_{rm} – относительное движение; 2) $S_{(p)lin} > 1.05S_{(p)el}$, $S_{(p)el}$ и $S_{(p)lin}$ – среднеквадратичные отклонения, определенные с учетом весов наблюдений, для моделей эллиптического и прямолинейного от-

носительных движений. В табл. 2 вывод 1 сделан посредством условия $\mu_{pm} > 5\mu_{tm}$, вывод 2 – посредством условия $S_{(p)lin} > 1.05S_{(p)el}$.

Глава III посвящена исследованию особенностей работы метода ПВД и определению погрешностей наблюдений визуально-двойных звезд.

В *разделе 3.1* описаны особенности алгоритмов получения модельных данных.

В *разделе 3.2* изучено, как изменяется точность элементов орбит, определяемых методом ПВД, в зависимости от следующих факторов: 1) длины дуги, охваченной наблюдениями; 2) точности параллаксов, сумм масс компонентов, относительных положений и относительных лучевых скоростей; 3) порядка используемых разложений полярных и декартовых координат.

Одна из основных трудностей метода ПВД связана с необходимостью вычисления радиуса кривизны (ρ_c). В работе доказано, что наиболее точно ρ_c определяется с помощью следующих двух подходов: 1) используются разложения полярных координат, $\dot{\rho}$ и $\dot{\theta}$ вычисляются из разложения третьего порядка, $\ddot{\rho}$ – второго порядка, $\ddot{\theta}$ – из закона площадей; 2) с поворотом осей координат, в основе лежат разложения декартовых координат третьего порядка.

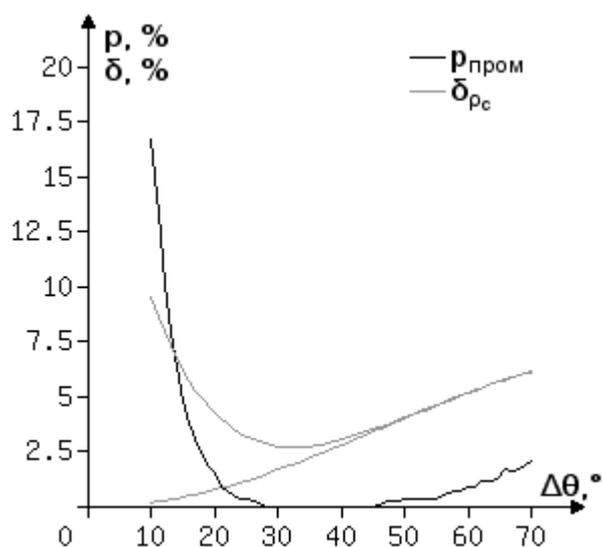


Рис. 2. Зависимости $p_{\text{пром}}$ и δ_{ρ_c} от длины дуги $\Delta\theta$ для разложений ρ и θ при $\sigma = 0$ и $\sigma = 0.001\bar{\rho}$

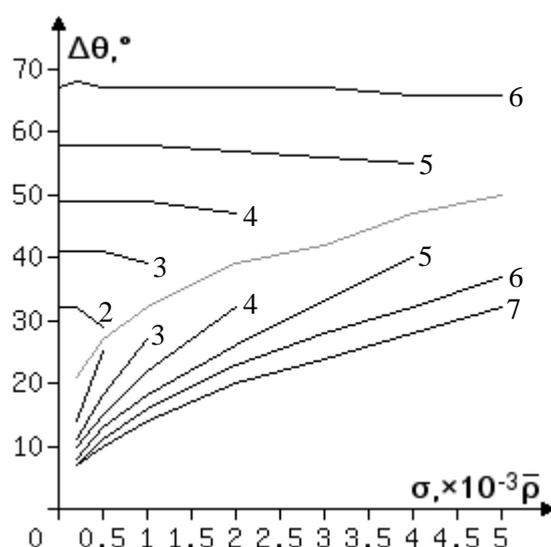


Рис. 3. Ограничивающие кривые для относительной ошибки (разложение ρ и θ)

Точность определения радиуса кривизны зависит от точности и количества используемых наблюдений и длины дуги, охваченной ими. На рис. 2 изображены зависимости средней относительной ошибки радиуса кривизны (δ_{ρ_c}) и относительного количества промахов ($p_{\text{пром}}$) от длины дуги, охваченной наблюдениями. Значения ρ_c считались промахами, если относительная ошибка превосходила 30%. На рис. 3 рассмотрены ограничивающие кривые и кривая, позволяющая найти оптимальную для определения радиуса кривизны длину дуги при заданной погрешности наблюдений. Результаты, изображенные на рис. 2 и 3, получены посредством статистических исследований: обрабатывалась одна тысяча модельных объектов, для каждого из них вычислялся радиус кривизны, затем определялись средняя относительная ошибка δ_{ρ_c} и относительное количество промахов $p_{\text{пром}}$. Вычисления повторялись для всех целых значений длин дуг из интервала $\Delta\theta \in [10^\circ, 70^\circ)$ при различных значениях погрешностей наблюдений. Для определения радиуса кривизны использовалось разложение полярных координат, количество наблюдений у модельных объектов было одинаково ($N = 30$).

Основные результаты, изображенные на рис. 2, сводятся к следующему: 1) в случае точных данных δ_{ρ_c} уменьшается с уменьшением длины дуги; 2) при обработке наблюдений, содержащих ошибки (в нашем случае $\sigma = 0.001\bar{\rho}$), имеется некоторая область длин дуг, в которой среднестатистическая точность определения радиуса кривизны максимальна, за пределами этой области δ_{ρ_c} и $p_{\text{пром}}$ возрастают; 3) если длина дуги, охваченная наблюдениями, достаточно велика, то относительные ошибки радиуса кривизны при обработке точных данных и данных, содержащих погрешности, становятся практически одинаковыми; 4) имеется область длин дуг, в которой отсутствуют промахи, в нашем случае для точных данных эта область $\Delta\theta < 45^\circ$, для данных с внесенными ошибками ($\sigma = 0.001\bar{\rho}$) $\Delta\theta \in (28^\circ, 45^\circ)$; 5) в случае длин дуг $\Delta\theta > 45^\circ$ кривые для промахов у точных данных и данных, содержащих ошибки ($\sigma = 0.001\bar{\rho}$), практически

совпадают. Полученные закономерности связаны с тем, что разложения координат являются приближенными выражениями. При увеличении длины дуги возрастают систематические ошибки разложений, а при ее уменьшении на результат начинают сильнее влиять погрешности наблюдений.

Графики рис. 3 позволяют выбрать оптимальную длину дуги, охваченную наблюдениями, для определения радиуса кривизны и оценить риски, связанные с использованием длины дуги, отличной от оптимальной. Например, при погрешности наблюдений $\sigma = 0.001\bar{\rho}$ оптимальная длина дуги около 30° , относительная ошибка δ_{ρ_c} при этом меньше 3%. Если при погрешности наблюдений $\sigma = 0.001\bar{\rho}$ орбита определяется по дуге 15° , то $\delta_{\rho_c} \approx 6.5\%$.

В разделе 3.3 предложен метод определения точности наблюдений отдельно взятых инструментов, изучена точность измерений, полученных следующими исследовательскими группами: 1) CHARA speckle (Sc – McA, Hrt, Msn), наблюдения проводились более 20 лет, в основном, в 80-х и 90-х годах [3]; 2) БТА (Bag и др.), взят весь период по настоящее время, более 30 лет [18]; 3) Хорч и др. (Hor), начиная с середины 90-х годов [19]. Результаты проведенных исследований представлены в табл. 3. Введены следующие обозначения: N_{st} – количество обработанных звезд, N_{obs} – общее число наблюдений, $N_{3\sigma}$ – количество наблюдений, исключенных правилом 3σ , $\bar{\rho}$ – средняя величина разделения, $\bar{S}_{\rho\Delta\theta}$, $\bar{S}_{\Delta\rho}$ – среднеквадратичные отклонения, вычисленные по используемым для определения орбит наблюдениям (их количество $N_{obs} - N_{3\sigma}$), $\bar{\sigma}_{\rho\Delta\theta}$, $\bar{\sigma}_{\Delta\rho}$ – среднеквадратичные отклонения, определенные с учетом малого количества наблюдений.

Таблица 3. Погрешности измерений								
	N_{st}	N_{obs}	$N_{3\sigma}$	$\bar{\rho}$, "	$\bar{S}_{\rho\Delta\theta}$, mas	$\bar{S}_{\Delta\rho}$, mas	$\bar{\sigma}_{\rho\Delta\theta}$, mas	$\bar{\sigma}_{\Delta\rho}$, mas
Sc	100	2498	112	0.170	3.25	3.98	3.57	4.35
БТА	40	457	12	0.130	2.59	1.85	3.40	2.42
Hor	30	414	5	0.148	2.52	2.63	2.91	3.09

В разделе 3.4 предложен метод, позволяющий последовательно уточнять значения погрешностей наблюдений, его можно применить для одновременной обработки данных различных инструментов. В ходе численных экспериментов было обнаружено, что при использовании совокупностей данных, в которых доминируют наблюдения более низких классов точности, происходит завышение весов наблюдений более высоких классов точности. Для устранения данного недостатка были введены поправки.

С помощью разработанного метода была изучена точность данных CHARA speckle и PTI [20]. Звезды, выбранные для проведения исследований, и основные результаты представлены в табл. 4 и 5.

Таблица 4. Информация о наблюдениях изучаемых звезд								
WDS	N_{Sc}	N_{PTI}	WDS	N_{Sc}	N_{PTI}	WDS	N_{Sc}	N_{PTI}
02157+2503	31	89	09036+4709	37	47	18570+3254	4	66
02537+3820	35	46	13100+1732	77	24	20375+1436	68	73
04136+0743	39	20	15232+3017	60	51	21145+1000	37	119
04357+1010	11	31	15278+2906	52	73	21148+3803	7	39
06024+0939	22	37	15416+1940	35	15	21446+2539	48	135
06041+2316	32	30	17080+3556	48	10	21501+1717	33	50
09006+4147	54	16	17217+3958	28	71	22409+1433	26	53

Таблица 5. Уточненные значения $\bar{\sigma}_i$					
$\bar{\sigma}_{\Delta\rho(Sc)}$,	$\bar{\sigma}_{\rho\Delta\theta(Sc)}$,	$\bar{\sigma}_{(Sc)}$,	$\bar{\sigma}_{\Delta\rho(PTI)}$,	$\bar{\sigma}_{\rho\Delta\theta(PTI)}$,	$\bar{\sigma}_{(PTI)}$,
10^{-3} "	10^{-3} "	10^{-3} "	10^{-3} "	10^{-3} "	10^{-3} "
3.408	3.176	3.294	0.355	0.370	0.362

В заключении приводятся основные результаты, полученные в работе.

В приложении описаны особенности наиболее часто используемых алгоритмов.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю доценту ЯГПУ им. К.Д. Ушинского Н.И. Перову и сотрудникам ГАО РАН А.А. Киселеву и Л.Г. Романенко за оказанную помощь и внимание к работе.

Орбиты звезд определялись по данным Вашингтонского каталога двойных звезд, четвертого интерферометрического каталога, данным сайта обсерватории

в Ницце. Работа выполнена с использованием баз данных SIMBAD и VizieR Страсбургского центра астрономических данных, а также библиографической базы данных NASA Astrophysics Data System. Автор благодарит создателей перечисленных электронных ресурсов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

1. *Байдин А.Э.* О вековых и периодических возмущениях в тройных звездных системах // Ярославский педагогический вестник. Серия «Физико-математические и естественные науки». – 2010. – №2. – С. 71-77.
2. *Байдин А.Э.* Особенности определения орбит визуально-двойных звезд на основе наблюдений коротких дуг видимого движения // Ярославский педагогический вестник. – 2010. – Т. III (Естественные науки). – №4. – С. 32-39.
3. *Байдин А.Э.* Анализ классических методов определения орбит визуально-двойных звезд // Ярославский педагогический вестник. – 2011. – Т. III (Естественные науки). – №4. – С. 71-75.
4. *Байдин А.Э.* Определение орбит визуально-двойных звезд с помощью генетических алгоритмов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2015. – Т. 7. – №1. – С. 11-19.
5. *Байдин А.Э., Перов Н.И., Романенко Л.Г.* Определение орбит визуально-двойных звезд, открытых Отто Струве в Пулковско // Вестник СПбГУ. Сер. 1. Математика. Механика. Астрономия. – 2018. – Т. 5(63). – Вып. 1. – С. 148-157.

Другие публикации автора по теме диссертации:

1. *Байдин А.Э.* Постановка лабораторной работы “Расчет невозмущенных орбит визуально-двойных звезд по пяти и более наблюдениям” // Сборник «Методика преподавания астрономии» / под ред. А.Ю. Румянцева. – Магнитогорск: МаГУ, 2005. – С. 66-68.

2. *Байдин А.Э.* Определение орбит визуально-двойных звезд // Материалы конференции «Чтения Ушинского» физико-математического факультета. – Ярославль: Изд-во ЯГПУ, 2006. – С. 66-71.
3. *Байдин А.Э.* Метод определения элементов орбиты визуально-двойной звезды для эллиптического и гиперболического движения // Электронный научный журнал «Исследовано в России». – 2007. – С. 480-490. – Режим доступа: <http://zhurnal.apc.relarn.ru/articles/2007/044.pdf>.
4. *Байдин А.Э.* Особенности современных методов определения орбит по коротким дугам // Материалы конференции «Чтения Ушинского» физико-математического факультета. – Ярославль: Изд-во ЯГПУ, 2009. – С. 36-42.
5. *Байдин А.Э.* Новые подходы определения орбит визуально-двойных звезд по коротким дугам // Материалы конференции «Чтения Ушинского» физико-математического факультета. – Ярославль: Изд-во ЯГПУ, 2010. – С. 60-66.
6. *Байдин А.Э.* Определение веса позиционных наблюдений визуально-двойных звезд при вычислении орбит // Сборник «Инновационная деятельность в астрономии, астрономическом образовании и просвещении» / под ред. Н.И. Перова. – Ярославль: Изд-во ЯГПУ, 2010. – С. 115-127.
7. *Байдин А.Э.* О систематическом ходе невязок при работе с наблюдениями визуально-двойных звезд // Материалы конференции «Чтения Ушинского» физико-математического факультета. – Ярославль: Изд-во ЯГПУ, 2011. – С. 63-73.
8. *Байдин А.Э.* Определение орбит ярких визуально-двойных звезд // Материалы конференции «Чтения Ушинского» физико-математического факультета. – Ярославль: Изд-во ЯГПУ, 2012. – С. 56-64.
9. *Байдин А.Э.* Особенности алгоритмов получения эталонных наблюдений двойных звезд // Материалы конференции «Чтения Ушинского» физико-математического факультета. – Ярославль: Изд-во ЯГПУ, 2014. – С. 9-19.
10. *Байдин А.Э.* Изучение точности спекл-интерферометрических измерений двойных звезд // Известия ГАО в Пулкове. – 2015. – №222. – С. 5-10.

11. *Байдин А.Э.* Определение орбит визуально-двойных звезд STF каталога по коротким дугам // Материалы конференции «Чтения Ушинского» физико-математического факультета. – Ярославль: Изд-во ЯГПУ, 2017. – С. 185-191.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Mason B.D., Wycoff G.L., Hartkopf W.I.* The Washington Visual Double Star Catalogue. – Washington: US Naval Observatory, 2017. – Режим доступа: <http://ad.usno.navy.mil/wds/wds.html>.
- [2] *Hartkopf W.I., Mason B.D.* Sixth Catalog of Orbits of Visual Binary Stars. – Washington: US Naval Observatory, 2017. – Режим доступа: <http://ad.usno.navy.mil/wds/orb6.html>.
- [3] *Hartkopf W.I., Mason B.D., Wycoff G.L., McAlister H.A.* Fourth Catalog of Interferometric Measurements of Binary Stars. – Washington: US Naval Observatory, 2017. – Режим доступа: <http://ad.usno.navy.mil/wds/int4.html>.
- [4] *Fabrizius C., Hog E., Makarov V.V. et al.* The Tycho double star catalogue // *Astron. Astrophys.* – 2002. – V. 384. – P. 180-189.
- [5] The Hipparcos and Tycho Catalogues. – ESA SP-1200, 1997.
- [6] *Van Leeuwen F.* Validation of the new Hipparcos reduction // *Astron. Astrophys.* – 2007. – V. 474. – P. 653-664.
- [7] *Gaia Collaboration, Prusti T., de Bruijne J.H.J. et al.* The Gaia mission // *Astron. Astrophys.* – 2016. – V. 595. – id.A1. – 36 p.
- [8] *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. – V. 122. – P. 3472-3479.
- [9] *Michalewicz Z.* Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs. – Berlin: Springer, 1996. – 388 p.
- [10] *Быков О.П., Холшевников К.В.* Прямые методы определения орбит небесных тел. – СПб: СПбГУ, 2013. – 150 с.

- [11] *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. – №6. – С. 1227-1241.
- [12] *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. – V. 98. – P. 1014-1039.
- [13] *Кутю П.* Наблюдения визуально-двойных звезд. – М.: Мир, 1981. – 238 с.
- [14] *Docobo J.A.* On the analytic calculation of visual double star orbits // *Celest. Mech.* – 1985. – V. 36. – P. 143-153.
- [15] *Субботин М.Ф.* Введение в теоретическую астрономию. – М.: Наука, 1968. – 800 с.
- [16] *Кияева О.В.* Определение динамического параллакса и оценка наклона орбиты двойной звезды на основе наблюдений короткой дуги // *Известия ГАО в Пулковке.* – 1982. – №199. – С. 13-18.
- [17] *Киселев А.А.* Теоретические основания фотографической астрометрии. – М: Наука, 1989. – 264 с.
- [18] *Максимов А.Ф., Балега Ю.Ю., Бекман У. и др.* Спекл-интерферометр 6-м телескопа БТА. – Preprint №182. – *Spec. Astrophys. Observatory*, 2003. – 18 с.
- [19] *Horch E.P., Ninkov Z., van Altena W.F. et al.* Speckle observations of binary stars with the WIYN telescope. I. Measures during 1997 // *Astron. J.* – 1999. – V. 117. – P. 548-561.
- [20] *Lane B.F., Muterspaugh M.W.* Differential astrometry of subarcsecond scale binaries at the Palomar Testbed interferometer // *Astrophys. J.* – 2004. – V. 601. – P. 1129-1135.