

УДК 520
ББК 22.61
В54

Витязев В. В.

В54 Анализ астрометрических каталогов с помощью сферических функций. — СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2017. — 224 с.
ISBN 978-5-288-05740-3

Рассматриваются методы анализа астрометрических каталогов, основанные на использовании скалярных и векторных систем ортогональных функций. Изложены базовые понятия астрометрии, позволяющие обобщить задачи обработки астрометрических наблюдений классическими и современными средствами. Описаны методы пикселизации данных на сфере, которые удобно применять при обработке современных каталогов, содержащих сотни миллионов звезд. Представлен новый метод определения углов взаимной ориентации двух систем отсчета (метод ROTOR), и показано его применение для анализа систематических разностей положений и собственных движений звезд каталогов FK5 и HIPPARCOS. Предложен новый алгоритм отделения сигнала от шума, адаптированный для пикселизации данных по методу HealPix. Впервые при использовании векторных сферических функций применена аналитическая модель уравнения яркости. Описанные методы использованы для сравнения массовых астрометрических каталогов PPMXL, UCAC4 и XPM.

Для научных сотрудников, аспирантов и студентов, работающих в области астрометрии.

УДК 520
ББК 22.61



Издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований
по проекту № 17-12-00021, не подлежит продаже

Научное издание

ВИТЯЗЕВ Вениамин Владимирович

Анализ астрометрических каталогов с помощью сферических функций

Редактор *Н. В. Седых* • Компьютерная верстка *А. М. Вейшторт* • Обложка *Е. В. Арделян*
Подписано в печать 26.06.2017. Формат 70×100¹/₁₆. Усл. печ. л. 18,2. Тираж 300 экз. Заказ №
Издательство Санкт-Петербургского университета. 199004, Санкт-Петербург, В. О., 6-я линия, д. 11.
Тел./факс +7(812) 328-44-22 • publishing@spbu.ru • publishing.spbu.ru
Типография Издательства СПбГУ. 199034, Санкт-Петербург, Менделеевская линия, д. 5.

ISBN 978-5-288-05740-3

© В. В. Витязев, 2017
© Санкт-Петербургский
государственный университет, 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	6
Глава 1. Введение в астрометрию	10
1.1. Задачи астрометрии и ее связь с другими разделами астрономии	10
1.2. Наземная оптическая астрометрия	10
1.3. Радиоастрометрия	13
1.4. Международная небесная система отсчета	13
1.5. Космическая астрометрия и ее принципы	14
1.5.1. Цели и задачи проекта HIPPARCOS	15
1.5.2. Цели и задачи проекта Gaia	18
1.6. Всеволновая астрометрия	19
1.6.1. ICRS в радиодиапазоне	19
1.6.2. ICRS в оптическом диапазоне	21
1.6.3. Массовые астрометрические каталоги	23
1.6.4. ICRS в инфракрасном диапазоне	25
Глава 2. Фундаментальные понятия астрометрии	27
2.1. Пространственно-временные системы координат (Reference Systems) ..	28
2.1.1. Системы координат в астрометрии, основанной на НТТ	29
2.1.2. Системы координат в астрометрии, основанной на СТО	29
2.1.3. Системы координат в астрометрии, основанной на ОТО	30
2.2. Пространственно-временные системы отсчета (Reference Frames)	30
2.3. Методология астрометрии	32
2.4. Астрометрический инструмент	34
2.5. Ошибки измерений. Индивидуальные разности	35
2.6. Редукционные уравнения	36
2.7. Абсолютные и относительные методы измерений	36
2.8. Характеристики астрометрических каталогов звезд и внегалактических радиоисточников	38
2.9. Случайные и систематические ошибки астрометрических каталогов ...	39
2.10. Задача об определении систематических разностей двух каталогов ...	41
Глава 3. Пикселизация данных на сфере	43
3.1. Распределение звезд на небе	43
3.2. Равномерная цилиндрическая проекция	44
3.3. Пикселизация по методу HealPix	44
3.3.1. Построение сетки HealPix	46
3.3.2. Принадлежность звезды заданному пикселу	48
Глава 4. Классический метод сравнения каталогов	51
4.1. Получение систематических разностей методом фильтрации	51
4.1.1. Пикселизация по ЕСР-трапециям	52
4.1.2. Выделение непериодических компонент в узких зонах склонения	52
4.1.3. Получение периодических компонент	53
4.1.4. Уравнение яркости	54

4.2. Спектральный анализ классических методик получения систематических разностей	54
4.2.1. Процедура пикселизации	55
4.2.2. О сглаживании осредненных значений	64
4.2.3. О сглаживании вручную	66
Глава 5. Представление систематических разностей с помощью скалярных ортогональных функций	69
5.1. Скалярный и векторный подходы	69
5.2. Раздельный анализ систематических разностей прямых восхождений и склонений	71
5.2.1. Сферические функции (базисы B_0 и B_1)	72
5.2.2. Учет уравнения яркости (базис B_2)	74
5.2.3. Функции «Лежандр—Фурье—Эрмит» (базис B_3)	75
5.3. Процедура получения коэффициентов разложения систематических разностей	76
5.3.1. Исходный материал и основная модель	76
5.3.2. Вычисление коэффициентов разложения	77
5.3.3. Статистические критерии установления старшего члена разложения	79
5.4. Модификация метода Броше для пикселизации по схеме ЕСП	81
5.5. Модификация метода Броше для пикселизации по схеме HealPix	87
5.6. Заключительные замечания	88
Глава 6. Использование векторных сферических функций	89
6.1. Векторное поле	89
6.2. Векторные сферические функции (ВСФ)	90
6.3. Представление поля разностей координат звезд по системе ВСФ	93
6.4. Связь коэффициентов разложения скалярных функций и векторных полей	94
6.5. Статистические критерии определения значимых членов разложения	99
6.5.1. Проверка значимости каждой гармоники	99
6.5.2. Анализ автокорреляционной функции	103
6.6. Зонные векторные сферические функции	105
6.7. Учет уравнения яркости	108
Глава 7. Интерпретация систематических разностей	110
7.1. Описание структуры систематических разностей в методе скалярных функций	110
7.2. Описание структуры систематических разностей в методе векторных функций	113
7.3. Модель систематических разностей координат и собственных движений звезд	114
7.4. Модель систематических разностей координат радиоисточников	120
7.5. Сравнение метода ВСФ с методом наименьших квадратов	122
Глава 8. Модель жесткого взаимного вращения двух систем отсчета	127
8.1. Постановка задачи	127
8.2. Уравнения жесткого вращения	128
8.3. Физическая и формальная модели систематических разностей	129
8.4. Углы поворота как функции коэффициентов разложения систематических разностей	131
8.5. Свойства аналитических решений	133

8.6. Определение коэффициентов C_j через углы поворота	135
8.7. Тесты вращения	137
8.8. Причины отрицательных тестов	139
8.9. Недостатки стандартного метода	141
8.10. Метод ROTOR для получения параметров вращения	142
8.11. Испытания метода ROTOR на примерах сравнения различных астрометрических каталогов	144
8.11.1. Численные эксперименты	147
8.11.2. Обсуждение результатов экспериментов	149
Глава 9. Сравнение каталогов FK5 и HIPPARCOS	152
9.1. Постановка задачи	152
9.2. Отбор звезд	154
9.3. Критика модели жесткого взаимного вращения систем отсчета FK5 и HIPPARCOS	156
9.4. Представление систематических разностей FK5–HIPPARCOS функциями «Лежандр–Фурье–Эрмит»	161
9.5. Структура систематических разностей FK5–HIPPARCOS	168
9.5.1. Система прямых восхождений каталога FK5	168
9.5.2. Система склонений каталога FK5	172
9.6. Обсуждение результатов	172
Глава 10. Сравнение каталогов PPMXL и UCAC4	175
10.1. Общие сведения о каталогах PPMXL и UCAC4	175
10.2. Представление систематических разностей PPMXL–UCAC4 с помощью ВСФ	176
10.3. Карты систематических разностей	179
10.4. Различия систем отсчета PPMXL и UCAC4	186
10.4.1. Тороидальные коэффициенты первого порядка	186
10.4.2. Сфероидальные коэффициенты первого порядка	188
10.4.3. Мера инерциальности систем отсчета PPMXL и UCAC4	188
10.5. Основные результаты сравнения каталогов PPMXL и UCAC4	189
Глава 11. Сравнение каталогов XPM и UCAC4	193
11.1. Общие сведения о каталогах XPM и UCAC4	193
11.2. Анализ систематических разностей XPM–UCAC4	195
11.2.1. Систематические разности координат	195
11.2.2. Систематические разности собственных движений звезд XPMx–XPMp	201
11.2.3. Систематические разности собственных движений звезд XPMx–UCAC4 и XPMp–UCAC4	204
11.3. Основные результаты сравнения каталогов XPM и UCAC4	209
Приложение. Комплексные сферические функции	212
П1. Комплексные сферические функции	212
П1.1. Скалярные комплексные сферические функции	212
П1.2. Векторные комплексные сферические функции	213
П2. Разложения действительной скалярной функции	216
П3. Разложения действительной векторной функции	217
П4. Учет уравнения яркости	218
Список литературы	221