

Жан Ковалевский

СОВРЕМЕННАЯ АСТРОМЕТРИЯ

Перевод с английского под редакцией В. Е. Жарова

50205



Фрязино 2004

Jean Kovalevsky

Modern Astrometry

Second Edition

With 139 Figures and 5 Tables



Springer

УДК 52
ББК 22.6
К56

Ж. Ковалевский. **Современная астрометрия**. Фрязино, «Век 2», 2004, – 480 с, илл. Перевод со 2-го английского издания под редакцией В. Е. Жарова. ISBN 5–85099–147–6.

В книге изложены основы современной астрометрии. Кроме описания классических астрометрических инструментов, таких как астрографы, меридианные круги и астролябии, в книге рассказывается об устройстве новых приборов, приводится описание новых методов, которые появились в последние 10–20 лет и которые вносят основной вклад в получение современных высокоточных астрометрических данных (ПЗС-приемники, космические телескопы им. Хаббла и Гиппаркос, оптическая и радионтерферометрия, лазерная локация, системы глобального позиционирования GPS и ГЛОНАСС, хронометрирование пульсаров). Значительное внимание уделено взаимосвязи астрометрии и других наук, в частности рассматривается круг фундаментальных задач, которые могут быть решены в астрофизике после запуска астрометрических спутников GAIA и SIM.

Книга является прекрасным пособием не только для астрометристов, но и для специалистов в области астрофизики и будет полезна научным сотрудникам, аспирантам и студентам, обучающимся астрономии.

Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований (проект 04–02–30034).



На обложке: Калязинский Радиотелескоп РТ-64, работающий по программе Пульсарной астрометрии.
Фото предоставлено Ю. П. Илясовым.

ISSN 0941-7834 (Astronomy and Astrophysics Library)
ISBN 3-540-42380-X (2nd Edition)
ISBN 5–85099–147–6 (издание на русском языке)

- © Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1994
- © Жаров В. Е., перевод и издание на русском языке, 2004
- © «Век 2», макет, 2004

Оглавление

Предисловие редактора перевода	13
Предисловия автора	15
Глава 1. Предмет астрометрии	20
1.1. Место астрометрии в астрономии	20
1.2. Задачи астрометрии	21
1.2.1. Внегалактические объекты	22
1.2.2. Звезды	23
1.2.3. Объекты в Солнечной системе	25
1.2.4. Система Земля–Луна	27
1.2.5. Заключение	28
1.3. Астрометрическая техника и методы	29
1.3.1. Астрометрия в малом поле	29
1.3.2. Астрометрия в большом поле	30
1.3.3. Измерение расстояний	30
1.3.4. Другие методы	31
1.3.5. Наземная или космическая астрометрия?	31
Глава 2. Формирование изображений	33
2.1. Основные принципы	34
2.1.1. Распространение световых лучей	34
2.1.2. Принцип Ферма	35
2.1.3. Распространение монохроматической световой волны	36
2.1.4. Принцип суперпозиции	38
2.1.5. Принцип Гюйгенса	38
2.2. Дифракция	39
2.2.1. Распространение ограниченной плоской волны	40
2.2.2. Дифракция на круглом отверстии	41
2.2.3. Функция рассеяния точки круглой апертуры	43
2.2.4. Разрешающая способность	45
2.3. Когерентность света	45
2.3.1. Ширина полосы	46
2.3.2. Время и длина когерентности	48
2.4. Инструментальные искажения	49

2.4.1.	Условное изображение	49
2.4.2.	Дефокусировка	51
2.4.3.	Сферическая aberrация	52
2.4.4.	Кома	52
2.4.5.	Астигматизм и кривизна поля	53
2.4.6.	Дисторсия	55
2.4.7.	Хроматическая aberrация	56
2.4.8.	Дифракционный хроматизм	58
Глава 3.	Влияние атмосферы на формирование изображений	59
3.1.	Монохроматическая атмосферная рефракция	60
3.1.1.	Приближенная теория атмосферной рефракции	60
3.1.2.	Приближение атмосферы сферическим слоем	61
3.1.3.	Формула Лапласа	63
3.1.4.	Нормальная рефракция	65
3.1.5.	Зависимость рефракции от температуры и давления	65
3.1.6.	Дифференциальная рефракция	67
3.2.	Хроматическая рефракция	67
3.2.1.	Поправки за хроматическую рефракцию	68
3.2.2.	Применение при наблюдениях звезд	68
3.2.3.	Эмпирическая поправка	69
3.2.4.	Упрощенная эмпирическая поправка	71
3.3.	Влияние рефракции на измерение расстояний	72
3.3.1.	Измерения расстояний в оптическом диапазоне длин волн	72
3.3.2.	Рефракция в радиодиапазоне	74
3.4.	Неоднородность атмосферы	77
3.4.1.	Структура атмосферы	77
3.4.2.	Турбулентность в атмосфере	79
3.4.3.	Статистические свойства турбулентной атмосферы	80
3.4.4.	Распространение волн в атмосфере	82
3.4.5.	Качество изображения, определяемое атмосферой	83
3.4.6.	Мгновенное изображение	85
3.4.7.	Разрешающая сила телескопов	86
3.4.8.	Адаптивная оптика	89
Глава 4.	Редукция наблюдений	92
4.1.	Теоретические и опорные системы отсчета	93
4.1.1.	Идеальная система отсчета	94
4.1.2.	Теоретические системы отсчета	94
4.1.3.	Условная система отсчета	95
4.1.4.	Условные опорные системы отсчета	96
4.1.5.	Изменение опорных координат	98
4.1.6.	Применение локальных координат	99

4.1.7.	Связь с небесной системой отсчета	101
4.1.8.	Новая промежуточная система	104
4.1.9.	Спутниковая астрометрия	104
4.2.	Геометрические эффекты	105
4.2.1.	Преобразование поле–фокус	105
4.2.2.	Годичный параллакс	108
4.2.3.	Другие параллактические поправки	110
4.2.4.	Собственные движения	111
4.3.	Оптические эффекты	112
4.3.1.	Аберрация	112
4.3.2.	Релятивистское отклонение света	114
4.3.3.	Релятивистская временная задержка света	115
4.3.4.	Доплеровское смещение частоты	116
4.4.	Редукция наблюдений	117
4.4.1.	Проблема определения координат тела	117
4.4.2.	Моделирование	118
4.4.3.	Калибровка	120
4.5.	Оценка параметров	120
4.5.1.	Понятие погрешности	121
4.5.2.	Оценка погрешности	122
4.5.3.	Метод наименьших квадратов	124
4.5.4.	Дисперсия и ковариации в методе наименьших квадратов	127
Глава 5.	Астрометрия в малом поле	129
5.1.	Фотографическая астрометрия	129
5.1.1.	Телескопы для астрометрии в малом поле	130
5.1.2.	Свойства фотографических пластинок	136
5.1.3.	Изображение звезды	140
5.1.4.	Измерения фотографических пластинок	142
5.1.5.	Определение положения изображения	144
5.1.6.	Математическая обработка измерений на пластинке	146
5.1.7.	Каталоги звезд	150
5.2.	Фотоэлектрические приемники в астрометрии	153
5.2.1.	Фотоумножители	153
5.2.2.	ПЗС-приемники	154
5.2.3.	Калибровка ПЗС	157
5.2.4.	Астрометрические наблюдения с помощью ПЗС	159
5.2.5.	ПЗС в режиме сканирования	161
5.3.	Астрометрия с использованием модулирующей решетки	164
5.3.1.	Теория модуляции сигнала с помощью решетки	164
5.3.2.	Обработка модулированного сигнала	165
5.3.3.	Многоканальный астрометрический фотометр	167

5.4.	Астрометрия на космическом телескопе имени Хаббла	170
5.4.1.	Описание космического телескопа имени Хаббла	171
5.4.2.	Качество изображения КТХ	171
5.4.3.	Описание датчиков точного наведения	173
5.4.4.	Обработка данных датчиков точного наведения в режиме функции передачи	177
5.4.5.	Обработка данных датчиков точного наведения в астрометрическом режиме	179
5.4.6.	Астрометрическое использование широкоугольной планетной камеры	181
5.5.	Лучевые скорости	183
5.5.1.	Спектроскопия	184
5.5.2.	Определение лучевых скоростей: CORAVEL	185
5.5.3.	Объективная призма	187
Глава 6.	Меридианные круги	191
6.1.	Измерение больших углов	192
6.1.1.	Измерение углов, определяемых вращением	192
6.1.2.	Определение углов	193
6.2.	Меридианный круг	195
6.2.1.	Принцип наблюдений на меридианном круге	195
6.2.2.	Описание меридианного круга	197
6.3.	Определение небесных координат	199
6.3.1.	Прямые восхождения	199
6.3.2.	Коллимация	200
6.3.3.	Наклонность горизонтальной оси	201
6.3.4.	Азимут горизонтальной оси	202
6.3.5.	Определение инструментальных постоянных	202
6.3.6.	Формула Бесселя	203
6.3.7.	Определение склонений	205
6.3.8.	Геометрические поправки к склонениям	205
6.3.9.	Гнутые трубы	206
6.3.10.	Ошибки рефракции	206
6.3.11.	Суммарная поправка к склонению	208
6.4.	Микрометры	209
6.4.1.	Микрометр с вращающейся маской	210
6.4.2.	Микрометр с качающейся решеткой	212
6.4.3.	Использование диссектора	216
6.4.4.	Микрометр на основе ПЗС	218
6.4.5.	ПЗС-телескопы	219
6.5.	Горизонтальные меридианные круги	220
6.5.1.	Пулковский горизонтальный меридианный круг	220
6.5.2.	Осевые меридианные круги	222

6.6.	Обработка меридианных наблюдений	223
6.6.1.	Относительные наблюдения	224
6.6.2.	Полная обработка	225
6.6.3.	Точность наблюдений	227
Глава 7.	Инструменты, использующие метод равных высот	230
7.1.	Принцип работы астролябий	231
7.1.1.	Геометрия наблюдения	231
7.1.2.	Кривизна параллели	233
7.2.	Описание астролябии	234
7.2.1.	Принцип работы призменной астролябии Даунсона	235
7.2.2.	Принцип работы астролябии с полным входным зрачком	236
7.2.3.	Описание астролябии с полным входным зрачком	237
7.2.4.	Астролябия Mark-4	241
7.2.5.	Параметры инструмента	242
7.3.	Метод равных высот	243
7.3.1.	Основная формула	243
7.3.2.	Процедура наблюдений	245
7.3.3.	Определение инструментальных параметров	246
7.3.4.	Определение координат звезд	247
7.3.5.	Каталоги звезд для астролябий	248
7.4.	Солнечная астролябия	249
7.4.1.	Принцип работы солнечной астролябии	249
7.4.2.	Описание многопризменной солнечной астролябии	251
7.4.3.	Обработка наблюдений	253
7.4.4.	Солнечная астролябия с переменной призмой	255
7.5.	Фотографическая зенитная труба	256
Глава 8.	Гиппаркос	259
8.1.	Эксперимент Гиппаркос	260
8.1.1.	Основные принципы устройства Гиппаркоса	261
8.1.2.	Описание спутника	262
8.1.3.	Входной каталог	265
8.1.4.	Номинальный закон сканирования	267
8.1.5.	Управление ориентацией спутника	268
8.1.6.	Стратегия наблюдений	269
8.1.7.	Управление полетом	270
8.1.8.	Обработка данных	270
8.2.	Обработка результатов счета фотонов	271
8.2.1.	Отклик одиночной щели	271
8.2.2.	Время прохождения через устройство отождествления звезд	273
8.2.3.	Переход от решетки к полю	274

8.2.4.	Опорные большие круги	276
8.2.5.	Определение ориентации спутника	277
8.2.6.	Параметризация углов, определяющих ориентацию спутника	278
8.2.7.	Счет фотонов на основной решетке	282
8.2.8.	Координаты на основной решетке	283
8.2.9.	Двойные и кратные звезды	285
8.3.	Редукция на большой круг	286
8.3.1.	Геометрия редукции	286
8.3.2.	Условные уравнения	288
8.3.3.	Составление и решение нормальных уравнений	289
8.4.	Определение астрометрических параметров	292
8.4.1.	Основные уравнения	292
8.4.2.	Редукция на сферу	293
8.4.3.	Определение астрометрических параметров	295
8.5.	Итерации и результаты для одиночных звезд	296
8.6.	Специальные задачи	297
8.6.1.	Двойные и кратные звезды	298
8.6.2.	Фотометрия в проекте Гиппаркос	300
8.6.3.	Объекты Солнечной системы	302
8.6.4.	Привязка к внегалактической системе отсчета	303
8.7.	Окончательный каталог Hipparcos	305
8.7.1.	Объединение каталогов	305
8.7.2.	Содержание каталога Hipparcos	306
8.8.	Эксперимент Тихо	308
8.8.1.	Принцип эксперимента Тихо	308
8.8.2.	Обнаружение звезд	309
8.8.3.	Идентификация звезд	310
8.8.4.	Уравнения для определения астрометрических параметров	311
8.8.5.	Определение астрометрических параметров	312
8.8.6.	Каталог Tycho	313
8.9.	Каталог Tycho-2	314
8.9.1.	Идентификация прохождений	314
8.9.2.	Вычисление положений звезд	315
8.9.3.	Каталог Tycho-2	316
Глава 9.	Астрометрия очень малого поля зрения	317
9.1.	Амплитудная интерферометрия звезд	317
9.1.1.	Интерференционные полосы	318
9.1.2.	Интерферометр Майкельсона	320
9.1.3.	Основное уравнение звездной интерферометрии	321
9.1.4.	Описание интерферометров	325

9.1.5.	Наблюдения двойных звезд	331
9.1.6.	Интерферометрия протяженных источников	334
9.1.7.	Разрешающая способность интерферометра	337
9.1.8.	Другие оптические интерферометры	338
9.2.	Стеклянная интерферометрия	340
9.2.1.	Обработка наблюдений автокорреляционным методом	341
9.2.2.	Обработка наблюдений с помощью преобразования Фурье	342
9.2.3.	Наблюдения	343
9.3.	Покрывания звезд Луной	344
9.3.1.	Дифракция на полуплоскости	344
9.3.2.	Приложение к покрываниям Луной	346
9.3.3.	Наблюдения покрываний	347
9.3.4.	Обработка наблюдений	348
9.3.5.	Достигнутая точность	350
Глава 10.	Фазовая интерферометрия	352
10.1.	Оптическая фазовая интерферометрия	352
10.1.1.	Общая теория	353
10.1.2.	Обработка наблюдений	355
10.1.3.	Поправка за рефракцию в интерферометре Mark III	356
10.1.4.	Астрометрия на интерферометре NPOI	357
10.1.5.	Астрометрическая точность	360
10.2.	Радиоинтерферометрия	360
10.2.1.	Радиотелескопы	360
10.2.2.	Интерферометрия в радиодиапазоне	363
10.2.3.	Радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой	366
10.2.4.	Редукция РСДБ наблюдений	368
10.2.5.	Наблюдения звезд методом РСДБ	370
10.2.6.	Космические РСДБ	372
Глава 11.	Измерение времени	373
11.1.	Хронометрия	373
11.1.1.	Осцилляторы	374
11.1.2.	Кварцевые осцилляторы	375
11.1.3.	Вынужденное излучение	379
11.1.4.	Цезиевые атомные стандарты частоты	380
11.1.5.	Атомные часы	387
11.1.6.	Атомные шкалы времени	390
11.2.	Лазеры	393
11.2.1.	Принцип действия лазера	393
11.2.2.	Применение в телеметрии	395
11.3.	Измерение расстояний с помощью лазера	396
11.3.1.	Инструменты для лазерной локации Луны	398

11.3.2.	Фотонный КПД лунных лазерных дальнометров	401
11.3.3.	Распознавание отклика и обработка данных	403
11.3.4.	Лазерная локация спутников	406
11.4.	Глобальная система позиционирования – GPS	408
11.4.1.	Принципы работы системы	408
11.4.2.	Описание GPS	409
11.4.3.	Измерения с использованием приемников GPS	410
11.4.4.	Другие навигационные системы	413
11.5.	Радиолокация планет	414
11.5.1.	Радиолокационные измерения	414
11.5.2.	Применение к планетам	417
11.5.3.	Радиолокация астероидов	417
11.6.	Хронометрирование пульсаров	418
11.6.1.	Хронометрирование импульсов	420
11.6.2.	Время распространения сигналов пульсаров	422
11.6.3.	Интерпретация наблюдений	423
11.6.4.	Астрометрические результаты	425
Глава 12.	Будущее астрометрии	427
12.1.	Достижения современной астрометрии	427
12.1.1.	Внегалактические объекты	427
12.1.2.	Звезды	429
12.1.3.	Объекты в Солнечной системе	430
12.2.	Области применения новой астрометрии	433
12.2.1.	Внегалактические объекты	434
12.2.2.	Звезды	437
12.2.3.	Наша Галактика	439
12.3.	Космические проекты для глобальной астрометрии	440
12.3.1.	Проект DIVA	441
12.3.2.	Проект FAME	442
12.3.3.	Проект GAIA	444
12.4.	Космическая интерферометрия	446
12.4.1.	Проект SIM	447
12.4.2.	Космические РСДБ	448
12.4.3.	Астрометрия с поверхности Луны?	449
12.5.	Перспективы наземной астрометрии	450
12.5.1.	ПЗС–астрометрия	450
12.5.2.	Астрометрия в очень малом поле	451
12.5.3.	Роль наземной астрометрии	452
12.6.	В качестве заключения	453
	Литература	455
	Предметный указатель	473

Жан Ковалевский

Современная астрометрия

Пер. с англ. под редакцией
Жарова Владимира Евгеньевича

Подп. в печ. 02.12. 2004. Формат 60x90/16.
Усл. п. л. 30. Тираж 400 экз. Заказ № Э-939

ООО «Век 2», 141195, г. Фрязино-5, Моск. обл. а/я 107.
Тел. (095) 785-56-39, доб. *15-14, E-mail: vek-2@mail.ru
Изд. лиц. ЛР № 070440 от 11.04.97.

ГУП ПИК «Идел-Пресс».
420066, г. Казань, ул. Декабристов, 2