

УДК 520.2.03+521.95

Опыт астрометрической редукции пластинок Таутенбургского телескопа системы Шмидта

В. Р. Дик, Г. А. Иванов, Т. П. Сергеева, А. И. Яценко

На автоматической машине ИФО-461 (ПАРСЕК-Н) Николаевского отделения ГАО АН СССР измерено четыре пластинки Таутенбургского телескопа системы Шмидта. Найдено, что средние квадратичные погрешности измерений координат звезд из каталога АГКЗ составляют ± 1.8 мкм. Для разностей идеальных и измеренных координат определяется вид аппроксимирующего полинома. Показано, что в случае использования каталога АГКЗ в качестве опорного достаточно включить в модель пластинки линейные и квадратичные члены, зависящие от координат, а также члены, описывающие влияние уравнивания блеска и комы. Приведены числовые значения коэффициентов для учета этих эффектов.

EXPERIENCE IN ASTROMETRIC REDUCTION OF TAUTENBURG SCHMIDT PLATES, by Dick W. R., Ivanov G. A., Sergeeva T. P., Yatsenko A. I.— Four Tautenburg Schmidt plates were measured on the automatic measuring machine PARSEC at the Nikolaev observatory. R. m. s. positional errors of AGK3 stars were found to be $\pm 1.8 \mu\text{m}$. The form of the orthogonal approximation polynomial was established for differences between tangential and measured coordinates. Using the AGK3 as a reference catalogue it was shown that the inclusion in the plate model of linear and quadratic coordinate dependent terms as well as coma and magnitude equation terms is sufficient. Numerical values of coefficients for these effects are given.

Необходимость создания массовых каталогов точных положений и собственных движений звезд, реализующих инерциальную систему координат в широком диапазоне звездных величин, назрела давно. Это повлекло за собой применение в последнее время нетрадиционных для классической фотографической астрометрии инструментов — светосильных широкоугольных астрографов Цейса и телескопов системы Шмидта. Определение положений небесных объектов с помощью таких инструментов имеет некоторые особенности. Одна из них — сложный вид астрометрической редукции измеренных координат звезд. Важной частью редукции измерений является установление по опорным звездам вида связи между идеальной и измеренной системами координат. При этом идеальные координаты звезд представляются в виде полинома по степеням измеренных координат и фотометрических характеристик звезд:

$$X_i - x_i = \sum_{l=0}^{g_1} \sum_{m=0}^{g_2} \sum_{n=0}^{g_3} b_{lmn} x_i^l y_i^m (m_i - m_0)^n + \xi_i, \quad (1)$$

где x_i, y_i — измеренные координаты звезд; m_i — звездные величины, а m_0 — их среднее значение; X_i, Y_i — идеальные координаты (формула для Y_i имеет аналогичный вид); ξ_i — остаточные отклонения; g_1, g_2, g_3 — степень полинома. Ввиду сложности оптических систем указанных телескопов и больших размеров фотографируемых полей редукционная модель (1) может содержать члены высших порядков от измеренных координат и отличаться количеством членов редукции от одного снимка к другому. Возникает вопрос, каково при этом необходимое и достаточное количество членов разложения вида (1) для конкретной пластинки.

Один из путей решения этой задачи показан в [3]. От разложения вида (1) осуществляется переход к аналогичному разложению в ортогональном базисе:

$$\xi = \sum_l \sum_m \sum_n a_{lmn} \psi_{lmn} + \zeta, \quad (2)$$

где ξ — вектор с компонентами $X_i - x_i$; векторы ψ_{lmn} удовлетворяют условию ортогональности $(\psi_{lmn} \cdot \psi_{ijk}) = 0$ для всех $l, m, n \neq i, j, k$ и получены методом ортогонализации Грамма — Шмидта [1] из вектора, компонентами которого являются значения $x_i^l y_i^m (m_i - m_0)^n$. Такой переход позволяет оперативно оценить значимость коэффициентов a_{lmn} и их ошибок, поскольку в ортогональном базисе эти коэффициенты определяются независимо друг от друга [1]. В дальнейшем по значимым величинам a_{lmn} можно найти коэффициенты неортогонального разложе-

Таблица 1. Частоты значимых коэффициентов редукции измерений (в ортогональном базисе)

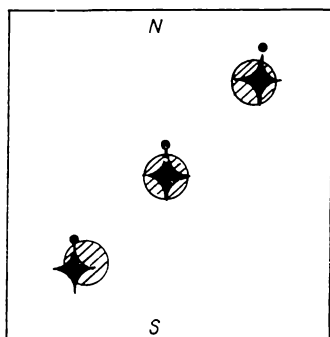
Коэффициент при неизвестном	Сравнение идеальных координат с измеренными				Сравнение измеренных координат двух экспозиций		Сравнение пластинок, полученных в двух положениях телескопа			
	Экспозиция						Экспозиция			
	длинная		короткая		x	y	длинная		короткая	
	x	y	x	y			x	y	x	y
1	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2
x	4	4	4	4	1	4	2	2	2	2
y	4	4	4	4	3	2	2	0	2	1
$z = m - m_0$	3	4	4	4	0	4	2	2	2	2
x^2	0	3	0	4	1	0	0	0	0	0
xy	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
y^2	0	0	0	0	0	1	0	2	0	1
xz	4	4	4	4	1	0	2	0	2	1
yz	1	0	3	2	1	2	1	0	0	2
x^3	4	0	4	0	0	1	0	0	0	0
x^2y	0	4	0	4	0	1	0	1	0	0
xy^2	4	0	4	0	0	0	0	0	0	0
y^3	0	3	0	4	1	2	0	1	0	0
x^4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x^3y	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x^2y^2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
xy^3	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
y^4	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0
x^5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x^4y	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
x^3y^2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
x^2y^3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
xy^4	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
y^5	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
Ошибки единицы веса, мкм	6.2	6.9	5.9	6.9	2.7	2.7	2.6	2.3	2.6	3.6

ния (1) и вычислить их ошибки [3]. Авторами работы [3] составлена также программа для ЭВМ, реализующая предложенный метод.

По описанной методике обработаны четыре пластинки, полученные на Таугенбургском телескопе системы Шмидта (6043, 6044, 6109, 6110). Координаты ($\alpha = 21^h 05^m$, $\delta = 52^\circ 30'$) центров снимков совпадают между собой. Пластинки 6043, 6044 сняты в июле 1984 г. при положениях трубы телескопа, отличающихся на 180° . Две другие пластинки образуют аналогичную пару, полученную через год. На каждой пластинке имеются две системы изображений звезд, сфотографированных с длинной (20^m) и короткой (20^s) экспозициями, сдвинутые одна относительно другой по δ примерно на 0.5 мм. На каждом снимке с помощью автоматической машины ИФО-461 (ПАРСЕК-Н) Николаевского отделения ГАО АН СССР измерено 68 звезд из каталога АГКЗ, который использовался как опорный.

Сначала для каждой пластинки и экспозиции определялся вид связи идеальных координат с измеренными (а). Затем сравнивались измеренные координаты изображений звезд, полученных с длинной и ко-

роткой экспозициями (б). И наконец, сравнивались между собой измерения звезд на пластинках, полученных в одну ночь при двух положениях трубы телескопа (в). Следовательно, мы имели четыре сравнения для каждой экспозиции типа (а), четыре сравнения типа (б) и два сравнения типа (в). Некоторое представление о виде аппроксимирующих полиномов для соответствующих случаев дает табл. 1, в которой приведены частоты появления коэффициентов полиномов вида (2) в ортогональном базисе. Там же даны средние значения ошибок единицы веса. Видно, что формулы редукции измеренных координат к идеальным содержат



линейные, квадратичные, кубические, а также члены, описывающие ошибки уравнения блеска (УБ) и комы. Если дисторсию, хорошо известную для телескопов системы Шмидта, учесть заранее, то кубические члены при

Изображения ярких звезд (6—8^m) на краях и в центре пластинки Таутенбургского телескопа системы Шмидта

обработке можно исключить. Однако в случае сравнения измеренных координат для разных экспозиций или разных пластинок появляются члены более высоких порядков. Отсутствие членов выше третьего порядка при сравнениях типа (а) объясняется скорее всего низкой точностью опорного каталога (АГКЗ) на эпоху наблюдений, случайные ошибки положений звезд которого заывают все тонкие эффекты. Как видно по ошибкам единицы веса для сравнения типа (б) и (в), случайные ошибки измерений составляют примерно ± 1.8 мкм. В то же время случайные ошибки каталога АГКЗ в масштабе используемых пластинок близки к ± 6 мкм. Наличие значимых членов четвертого и пятого порядков по координате y и их отсутствие по координате x можно попытаться объяснить двумя вероятными причинами. Во-первых, для ярких звезд изображения с длинной и короткой экспозициями располагаются (по координате y) очень близко друг от друга. Вид изображений ярких звезд при длинной экспозиции зависит от удаления их от центра пластинки (рисунк). Оба эти эффекта, складываясь, могут приводить к неправильной оценке измеренного положения звезды прибором. Во-вторых, нельзя исключать возможность некоторых деформаций, также направленных вдоль оси y , в оптических узлах телескопа, так как при наблюдении не в зените и вблизи меридиана ось y близка к направлению силы тяжести. Однако имевшийся в нашем распоряжении материал нельзя считать достаточным для окончательных выводов подобного рода.

В нашей работе особое внимание уделялось ошибкам УБ и комы. Величина ошибки УБ в фотографических положениях звезд зависит от множества факторов, связанных с условиями фотографирования, проявления, измерений пластинки, а также от ошибок используемого опорного каталога. Разделить влияние перечисленных причин на величину ошибки УБ чрезвычайно трудно, если вообще возможно. Однако с помощью снимков, полученных в близких условиях при положениях трубы телескопа, отличающихся на 180° , можно попытаться выделить инструментальную часть УБ, изменяющую знак при переключке инструмента. Пренебрегая другими возможными источниками УБ, будем формально считать, что коэффициент УБ, полученный из решения системы уравнений вида (1), можно для основного положения трубы телескопа записать так:

$$d_{0^\circ x,y} = k_{x,y} + p_{x,y}, \quad (3)$$

где k — «каталожная»*, а p — инструментальная части уравнения блеска. Индексы x, y показывают, что соотношения по координатам x и y имеют одинаковый вид. Тогда для снимка, полученного после перекладки трубы телескопа, будем иметь

$$d_{180^\circ x, y} = k_{x, y} - p_{x, y}. \quad (4)$$

Из выражений (3), (4) можно вычислить каталожную и инструментальную части УБ, взяв соответственно полусумму и полуразность

Таблица 2. Средневзвешенные значения коэффициентов редукции

Координата	Экспозиция	УБ _{катал} 10 ⁻⁴ мм/1 ^m	УБ _{инстр} 10 ⁻⁴ мм/1 ^m	УБ' _{инстр} 10 ⁻⁴ мм/1 ^m	Кома, 10 ⁻⁵ мм/(1 ^m ·мм)	Дисторсия, 10 ⁻⁸ мм ⁻²
x	Длинная	+9.1±4.4	-2.0±4.4	+0.8±1.6	-1.0±0.6	+2.28±0.15
x	Короткая	+11.3±4.4	+1.2±4.4	-0.9±1.7	-1.4±0.5	+2.30±0.15
x	Среднее	+10.2±3.1 (+0.053± ±0.016)	-0.4±3.1 (-0.002± ±0.016)	0.0±1.2 (0.0±0.006)	-1.2±0.4 (-0.0006± ±0.0002)	+2.29±0.11 —
y	Длинная	+6.2±4.9	-3.2±4.9	-4.5±1.5	-1.6±0.9	+2.24±0.19
y	Короткая	-3.5±5.2	-5.8±5.1	-2.8±2.4	-0.2±0.9	+2.24±0.16
y	Среднее	+0.4±3.1 (+0.002± ±0.016)	-4.4±3.5 (-0.023± ±0.018)	-4.0±1.2 (-0.021± ±0.006)	-0.9±0.6 (-0.0005± ±0.0003)	+2.24±0.12 —

Примечание. В скобках даны значения УБ в "/1^m и комы в "/(1^m·мм).

коэффициентов d_0° и d_{180° . Коэффициент инструментального УБ можно также определить из сравнения по формулам (1), (2) измеренных координат звезд на пластинках, полученных в двух положениях трубы телескопа. В этом случае коэффициент инструментальной ошибки УБ будет равен половине коэффициента при фотометрической характеристике звезды ($z_i = m_i - m_0$). В табл. 2 приведены средневзвешенные значения каталожной и инструментальной частей УБ. Инструментальная часть УБ, найденная из прямого сравнения измеренных координат двух пар пластинок, отмечена штрихом. Веса назначались соответственно вычисленным значениям ошибок коэффициентов, полученным при решении систем уравнений вида (1). Из табл. 2 следует, что по координате x имеется значительная каталожная ошибка УБ. В то же время инструментальная часть УБ мала и влияет в основном на измерения по координате y . Наличие такой ошибки можно объяснить влиянием изображений звезд двух экспозиций друг на друга, а также видом изображений ярких звезд на пластинке (рисунок).

В табл. 2 приведены также средневзвешенные значения коэффициентов комы и дисторсии. Величина коэффициента дисторсии близка к теоретическому значению, равному для данного телескопа 2.07×10^{-8} мм⁻². Значения коэффициентов УБ, комы и дисторсии, полученные по изображениям при длинной и короткой экспозициях, близки между собой. Их средневзвешенные (по двум экспозициям) значения приводятся дважды, сначала в миллиметрах (как они используются при редукции пластинок), а затем в секундах дуги (что нагляднее при оценке влияния этих ошибок на положения звезд).

Итак, по ошибкам единицы веса (табл. 1), полученным при сравнении измеренных координат звезд для разных экспозиций и пластинок, можно сделать вывод о том, что случайные ошибки измерений составляют примерно ± 1.8 мкм (около $\pm 0.1''$). Простой подсчет с использо-

* Взято в кавычки (которые в дальнейшем будем опускать), поскольку эта часть УБ может также содержать ошибки, зависящие от звездной величины, присущие измерительному прибору.

ванием данных табл. 2 показывает, что такая же систематическая ошибка УБ по координате y достигается на интервале 5 зв. вел. Что касается комы, то систематическая ошибка 0.1" возникает на краю пластинки для интервала всего 1 зв. вел.

Выводы. При обработке измерений пластинок Таутенбургского телескопа системы Шмидта с использованием опорного каталога, равного или хуже по точности, чем АГКЗ, редуциционный полином можно ограничить линейными и квадратичными членами от измеренных координат. При большом интервале звездных величин измеряемых объектов необходимо также включать члены, описывающие влияние ошибок УБ и комы. Кроме того, измеренные координаты следует исправить заранее за влияние дисторсии, теоретическое значение которой хорошо известно. Случайные ошибки измерений, выполненных на пластинках Таутенбургского телескопа системы Шмидта с помощью автоматической измерительной машины ИФО-461, составляют примерно ± 1.8 мкм.

1. Зверев М. С., Курьянова А. Н., Положенцев Д. Д., Яцкив Я. С. Сводный каталог фундаментальных слабых звезд со склонениями от $+90^\circ$ до -20° (ПФСКЗ-2).— Киев: Наук. думка, 1980.—108 с.
2. Иванов Г. А., Онегина А. Б., Яценко А. И. Учет уравнения блеска с использованием экспозиций разной длительности. II // Кинематика и физика небес. тел.—1985.—1, № 1.—С. 11—17.
3. Курьянова А. Н., Кизюн Л. Н. Опыт использования ортогональных полиномов для установления связи между измеренными и идеальными координатами // Там же.—1, № 2.—С. 9—14.

Центр. ин-т астрофизики АН ГДР,
Потсдам — Бабельсберг,
Глав. астрон. обсерватория АН УССР, Киев

Поступила в редакцию 17.05.88,
после доработки 27.07.88

Окончание. Начало на с. 73

Авторы благодарны Е. М. Ненаховой за помощь при исследовании окулярного микрометра.

1. Зайченко В. И., Кухарский Л. А., Харин А. С. Автоматическая машина для измерения фотографий лимба // Астрометрия и астрофизика.—1974.—Вып. 23.—С. 84—86.
2. Кухарский Л. А., Харин А. С. Устройство дистанционного вывода данных на перфоратор // Астрон. циркуляр.—1979.—№ 1084.—С. 3—4.
3. Подобед В. В. Фундаментальная астрометрия.— М.: Наука, 1968.—452 с.
4. Таблицы рефракции Пулковской обсерватории / Под ред. В. К. Лбалаккина.— 5-е изд.— Л.: Наука, 1985.—48 с.
5. Циммерман Г. К. Свободный от гнутия вертикальный круг // Тр. 14-й астрометр. конф. СССР.— М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1960.—С. 155—161.

Глав. астрон. обсерватория АН УССР, Киев,
Астрон. обсерватория Киев. ун-та им. Т. Г. Шевченко

Поступила в редакцию 11.03.88