

на одной вертикали, соответствуют одному и тому же моменту времени. Интервалы t_1, t_2, \dots, t_9 есть времена наблюдения за первым, вторым и так далее потоками. Из рисунка видно, что интервал наблюдения за четвертым потоком t_4 пришлось распределить между первым и вторым приборами, а интервал t_7 — между вторым и третьим.

При таком способе распределения все приборы заняты и нет случаев одновременного измерения одного потока несколькими приборами.

Поступило в редакцию 4 июня 1980 г.

УДК 535.8 : 535.242.2

М. П. ГРИШИН, В. Н. КОРЕШКОВ, Ш. М. КУРБАНОВ, В. П. МАРКЕЛОВ
(Москва)

ИССЛЕДОВАНИЕ КООРДИНАТНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ АВТОМАТИЧЕСКОГО МИКРОДЕНСИТОМЕТРА С УПРАВЛЕНИЕМ ОТ ЭВМ

При создании автоматических микроденситометров (АМД) с управлением от ЭВМ [1] необходимы прецизионные системы сканирования, реализующие автоматическое перемещение и измерение координат элементов фотометрируемого изображения в плоскости X, Y и ввод в ЭВМ результатов измерения. В настоящее время в литературе мало представлены методические указания по применению и методике исследования координатных погрешностей выпускаемых приборов типа АМД, что затрудняет использование этих приборов на практике. В статье приводятся анализ и исследование координатных погрешностей прибора АМД-1.

Система сканирования автоматического микроденситометра АМД-1 состоит из двухкоординатного стола с электрическим приводом на шаговых двигателях с электронным дроблением основного шага. Это позволяет, наряду с высокой скоростью движения (~ 10 мм/с), получить высокую плавность и малое значение одиночного шага перемещения (около 0,7 мкм).

Конструкция стола выполнена по крестовой схеме и содержит две каретки (рис. 1). Одна из них (каретка K_x) перемещается в направлении оси X , а ее перемещение измеряется датчиком линейных перемещений D_x . Каретка K_x несет на себе датчик перемещений D_y и каретку K_y , на которой расположен пленочный носитель (фотоэмульсия, фотопластинка). Каретка K_y перемещается по оси Y , и ее перемещение измеряется датчиком D_y . Линейные перемещения обеих кареток осуществляются с помощью ходовых винтов и управляемых шаговых двигателей. Каретка K_x несет на себе ходовой винт и шаговый двигатель привода каретки K_y .

В качестве датчиков линейных перемещений применены фотоэлектрические датчики совместно с цифровым отсчетным устройством.

Основными элементами датчика являются длинная растровая решетка (шкала) и короткая индексная решетка (индекс), представляющие собой стеклянные пластины, на которых с постоянным шагом $t=0,2$ мм нанесены непрозрачные штрихи шириной 0,1 мм (рис. 2). Оба элемента — шкала и индекс — расположены параллельно друг другу с небольшим зазором $\approx 0,08$ мм, штрихи при этом должны быть параллельны друг другу. За индексом находятся четыре кремниевых фотоприемника (ФП), освещаемых источником, установленным за шкалой. На каждый ФП попадает свет, прошедший только через одну из четырех групп штрихов на индексной решетке, нанесенных с последовательным смещением по шагу на величину $1/4t$ относительно предыдущей группы. Благодаря этому с ФП датчика снимаются сигналы треугольной формы с соответствующим сдвигом по фазе. Эти сигналы, выровненные по величине среднего значения при помощи подстроечных сопротивлений, поступают в цифровое устройство, в котором проводится электронная интерполяция отсчетов перемещения, позволяющая получить цену отсчета до 1 мкм [2, 3].

Шкалы датчиков расположены вдоль направляющих стола прибора на соответствующих каретках. Осветительная система с индексной решеткой и фотоприемником датчика перемещений по координате X установлена на корпусе прибора, а датчик по координате Y — на каретке K_x .

Ошибки датчиков измерения координат системы зависят от точности изготовления шкал, индексных решеток [4], согласования уровней сигналов фотоприемников и точности электронной интерполяции цифрового устройства, а также от погрешностей, вызываемых несоблюдением принципа Аббе. Суммарная ошибка измерения координат системы не превышает 0,008 мм, предельная внутришаговая ошибка датчиков равна 0,004 мм.

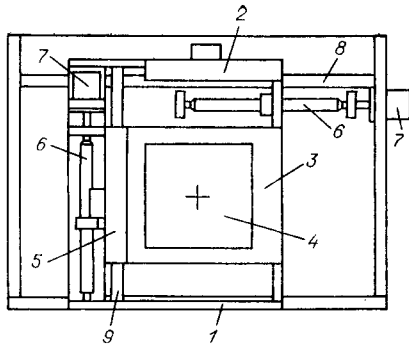


Рис. 1. Конструкция стола микроденситометра АМД-1:

1 — каретка K_x , 2 — датчик D_x , 3 — каретка K_y , 4 — плоскость образца, 5 — датчик D_y , 6 — ходовые винты, 7 — шаговые двигатели, 8 — направляющая оси X , 9 — направляющая оси Y .

линейности направляющих, а также смещение этой каретки, так и ее разворот вокруг произвольных осей. Смещение каретки K_x будет происходить в вертикальной и в горизонтальной плоскостях в направлении, перпендикулярном направлению ее перемещения (в данном случае по оси Y). Эти погрешности войдут в координатные ошибки по координате Y . Аналогично из-за погрешностей направляющих и роликовых опор каретки K_x будет внесена соответствующая ошибка в измерения по координате X . При этом предполагается, что перемещения измеряются относительно неподвижной системы координат, жестко связанной с основанием прибора, и за этой системой координат закреплена некоторая визирная ось, перпендикулярная плоскости, в которой происходит перемещение носителя с изображением. Здесь такой линией является оптическая ось фотометрического узла прибора.

Как уже было отмечено, ошибки направляющих и эксцентриситет роликовых опор кареток приводят к сложному развороту кареток вокруг оси, перпендикулярной к плоскости их перемещения, который можно разложить на элементарные составляющие — разворот вокруг оптической оси — и соответствующие линейные смещения кареток по координатам X и Y . Разворот вокруг оптической оси во многих случаях практически не влияет на точность измерений расстояний между различными точками, расположенными на пленочном носителе, и на точность фотометрирования участков пленочного носителя осесимметричными круглыми или квадратными диафрагмами. При фотометрировании протяженными щелевыми диафрагмами (например, при расшифровке линий спектров) это может привести к искажению характера линий и погрешностям измерений.

Перемещения и наклоны кареток в вертикальной плоскости приводят также к ошибкам измерений координат, а из-за выхода пленочного носителя из плоскости фокусировки — к ошибкам фотометрирования.

Помимо отмеченных выше источников ошибок измерения координат, могут наблюдаться так называемые масштабные ошибки, возникающие из-за наклона измерительных шкал к направлению перемещения или неперпендикулярности направляющих прибора.

В целях исключения влияния люфтов при сканировании применены ходовые винты с разрезной гайкой и силовым замыканием ее частей, цапговое сочленение гайки с кареткой, а перемещение кареток осуществляется по роликовым опорам замкнутого типа. В приборе предусмотрена возможность выборки люфтов в подшипниках ходовых винтов.

Для оценки указанных координатных ошибок за основу была взята методика, изложенная в [5]. Согласно этой методике, экспериментально находились инструментальные погрешности системы путем измерения координат точек (крестов) контрольной сетки, изготовленной с высокой точностью (ошибка изготовления не хуже ± 1 мкм). Исследование выполнялось в следующем порядке. Контрольная сетка ориентировалась примерно по направлению оси прибора X , и измерялись координаты перекрестий центральных линий контрольной сетки с шагом измерения 40 мм на длине 160 мм. Измерения выполнялись в 9 точках, в прямом и обратном обходах, по два последовательных наведения на перекрестие в каждом обходе. Из отсчетов, полученных при четырех наведениях, использовался средний. По результатам измерения координат точек контрольной сетки определялись систематические ошибки, обусловленные разворотом контрольной сетки и неперпендикулярностью направляющих. Обработка результатов измерений проводилась в следующем порядке.

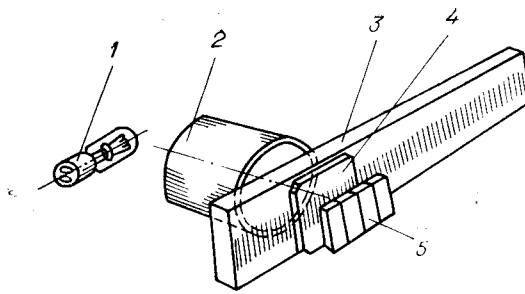


Рис. 2. Схема датчика линейных перемещений:

1 — осветительная лампа, 2 — объектив, 3 — шкала, 4 — индекс, 5 — фотоприемники.

Помимо указанных выше ошибок, на точность измерений оказывают влияние и другие факторы, например, при движении каретки K_x в направлении X из-за непря-

Номер измеренных точек	X_{xy}	Y_{xy}	α_y	α_x	δ_α	X	Y	Δ_x	δ_x	δ_y
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
10	-79991	-27	0,33·10 ⁻³	—	—	-79991	-2		-9	-2
20	-39998	-10				-39998	+2		-2	+2
00	0	0				0	0		0	0
30	+39997	+12				+39997	0		-3	0
40	+79995	+28				+79995	+3		-5	+3
01	+62	+80010	0,798·10 ⁻³	—	-0,468·10 ⁻³	-1,3	+80010	-37,4	-1,3	+10
02	+39	+40003				+7	+40003	-18,7	+7	+3
00	0	0				0	0	0	0	
03	-30	-40006				+1,9	-40006	+18,7	+1,9	+6
04	-63	-80009				+0,8	-80009	+37,4	+0,8	+9

Сначала проводилось преобразование измеренных значений в систему координат контрольной сетки согласно уравнениям

$$X_{xy} = V_x - V_{x0}; \quad Y_{xy} = V_y - V_{y0},$$

где X_{xy} , Y_{xy} — значения координат точек относительно центральной точки контрольной сетки; V_x , V_{x0} , V_y , V_{y0} — результат измерения координат точек контрольной сетки прибором.

Далее вычислялся наиболее вероятный угол разворота α_y контрольной сетки относительно оси X :

$$\alpha_y = [Y_{x0} X_{x0}] / [X_{x0}^2].$$

Здесь X_{x0} , Y_{x0} — значение координат точек оси X контрольной сетки.

Затем находился наиболее вероятный угол δ_α неперпендикулярности направляющих прибора:

$$\delta_\alpha = \alpha_y - \alpha_x = \alpha_y - [X_{0y} Y_{0y}] / [Y_{0y}^2]$$

(X_{0y} , Y_{0y} — значение координат точек оси Y контрольной сетки).

На основе найденных величин рассчитывались исправленные значения координат точек по углу разворота сетки относительно осей X и Y :

$$X = X_{x0} + Y_{x0} \alpha_y; \quad X = X_{0y} - Y_{0y} \alpha_x;$$

$$Y = Y_{x0} - X_{x0} \alpha_y; \quad Y = Y_{0y} + X_{0y} \alpha_x.$$

Влияние неперпендикулярности направляющих прибора на погрешность измерения оценивалось с помощью зависимости

$$\Delta_x = Y_{0y} \delta_\alpha.$$

Далее определялись ошибки измерений с учетом неперпендикулярности направляющих:

$$\delta_x = X - X_{эт}; \quad \delta_y = Y - Y_{эт},$$

где $X_{эт}$, $Y_{эт}$ — значение координат точек по контрольной сетке.

Изложенная выше методика использовалась для оценки координатных погрешностей автоматических микроденситометров с управлением от ЭВМ М400.

Результаты измерений и расчет ошибок представлены в таблице. Как следует из граф 10 и 11, после исключения разворота сетки и неперпендикулярности направляющих прибора ошибка в измерениях не превышает 10 мкм. Согласно данным таблицы (см. графу 9), на уровень ошибки в значительной мере оказывает влияние неперпендикулярность направляющих стола прибора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Браилко Л. А. и др. Цифровой автоматический микроденситометр с управлением от ЭВМ.— ОМП, 1976, № 4.
2. Фотоэлектрические преобразователи информации/Под ред. Л. Н. Преснухина. М.: Машиностроение, 1974.
3. Мироенко А. А. Фотоэлектрические измерительные системы. М.: Энергия, 1967.
4. Колотилин Е. Е. Об усреднении случайных погрешностей шага штрихов в линейных преобразователях с растровыми решетками.— Измерительная техника, 1974, № 4.
5. Филимонов Е. В., Шмидт И. А. Исследование стекометра.— Геодезия и картография, 1966, № 10.

Поступило в редакцию 10 мая 1978 г.;
окончательный вариант — 16 апреля 1979 г.