

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОГО АВТОМАТА «ЗЕНИТ»

УДК 621.391 : 681.3.01

Л. А. ВОРОНЦОВА, Г. П. ЧЕЙДО

(Новосибирск)

СОСТАВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОГО АВТОМАТА «ЗЕНИТ»

В процессе наладки и опытной эксплуатации макета прецизионного фотограмметрического автомата «Зенит» [1], подключенного к ЭВМ «Минск-22М», разработано довольно обширное математическое обеспечение, в котором по выполняемым функциям можно выделить три раздела: системное, метрологическое и специальное математическое обеспечение. Ниже приводится общая характеристика каждого из этих разделов. Более подробно первые два раздела охарактеризованы в работе [2], а отдельные задачи специального математического обеспечения освещены в статьях этого выпуска.

Системное обеспечение предназначено для организации взаимодействия ЭВМ с устройством, создания управляющих и сервисных программ, обеспечения удобного хранения и быстрого запуска рабочих программ, полученных трансляцией как с языка ФОРТРАН, так и с «Макрокода».

Связь между ЭВМ и прибором «Зенит» осуществляется по специальной команде обращения к прибору, включенной в систему команд вычислительной машины и имеющей вид

—64 A_1 A_2 .

Связь имеет двусторонний характер, т. е. вычислительная машина может как передавать информацию в прибор из памяти, так и получать ее от прибора. Из машины передается директивная информация. Она формируется и записывается в ячейку с адресом A_1 до передачи управления команде обращения. Информация из прибора поступает в ячейку с адресом A_2 .

Представление о наборе директив дает таблица, где приведены (кроме узкоспециальных, используемых только для отладки системы) команды управления механической системой перемещения, сканирующей системой и дополнительными устройствами, которые могут подключаться к системе, как, например, лазер, перо для вычерчивания графиков, визуализатор поля сканирования и т. д. Директива занимает в ячейке разряды с 25-го по 36-й, разряды 0—24 отводятся для дополнительной информации. В таблице приведены кроме восьмеричного представления директив наименования реализующих их макрокоманд и процедур на языке ФОРТРАН. Директивы реализуют только элементарные операции. Для ускорения и облегчения написания программ, связанных с использованием фотограмметрического автомата, разработан комплекс управляющих программ, представляющий собой стандартные модули различной степени сложности, освобождающие пользо-

Команды	Информация к директиве				Восьмеричное представление директивы	Наименование макрокоманды	Наименование процедуры на ФОРТРАНе
	Разряды						
	0	1—12	13—23	24			
«Запись в счетчик X»	±	Координата X		2005	ЗАПХ X	WRITX (X)	
«Запись в счетчик ΔX»	±	Приращение ΔX		2205	ЗАПДХ ДХ	WRITDX (DX)	
«Запись в счетчик Y»	±	Координата Y		2105	ЗАПУ Y	WRITY (Y)	
«Запись в счетчик ΔY»	±	Приращение ΔY		2305	ЗАПДУ ДУ	WRITDY (DY)	
«Общий сброс»				4005	СБОВЩ	SBOB	
«Опрос счетчика X»				6405	ОПРХ P1	OPRX (X)	
«Опрос счетчика Y»				6505	ОПРУ P1	OPRY (Y)	
«Пуск»				0104	ЗПУСК	ZSTART	
«Стоп»				0114	ЗСТОП	ZNSTOP	
«Измерение пропускания»		x	y	0011	ПРОП X, Y, T	TRANSM	
«Поиск (1-е слово)»		x ₀	y ₀	0003	ТОЧКА X, Y	POINT (X, Y)	
«Поиск (2-е слово)»		N _x	N _y	0023	ПОИСК	SEARCH	
«Интерполяция»	±	Δx	Δy	0013	ИНТЕР ДХ, ДУ	INTER (X, Y)	
«Подъем пера»				0134	ПДП	UPP	
«Опускание пера»				0124	ОПП	DOWNP	
«Включение лазера»				2445	ВКЛЛ	LASON	
«Выключение лазера»				0445	ВЫКЛЛ	LASOFF	

вателя от забот о преобразовании исходной и полученной информации, о компоновке директив и т. п. Эти модули реализованы на двух языках: «Макрокод» и ФОРТРАНе. Для повышения быстродействия тела большинства процедур выполнены на языке «Полукод», близком к машинному.

В целях обеспечения оперативности использования рабочих программ и удобства их хранения создана магнитная лента библиотеки рабочих программ, представляющая собой хранилище рабочих программ, снабженное специальной обслуживающей программой. Эта программа выполняет функции мониторинга системы и обеспечивает запись рабочих программ в хранилище, удаление их, вызов и запуск независимо от того, на каком языке производилось программирование. Более подробное описание библиотеки рабочих программ и обслуживающей программы приведено в работе [2].

Метрологическое обеспечение — специализированная часть математического обеспечения, ответственная за поддержание на высоком уровне метрологических параметров фотограмметрического автомата. Сюда входят тестовые и калибровочные программы, предназначенные как для проверки взаимодействия основных узлов, так и для измерения важнейших метрологических параметров, необходимых для построения системы координат, в которой компенсируется ряд погрешностей, неизбежных при изготовлении и эксплуатации прибора. Наличие на «Зените» двух независимых систем отсчета координат — сканирующей системы и лазерных интерферометров — предъявляет к метрологическому

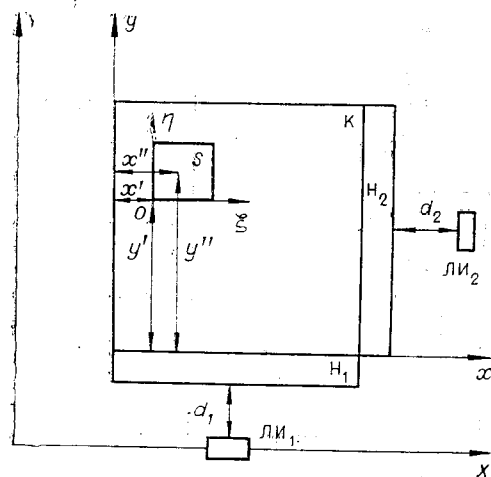


Рис. 1.

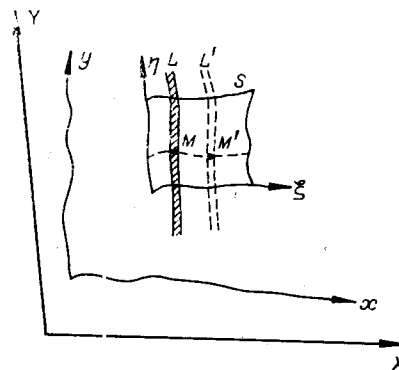


Рис. 2.

обеспечению специфические требования по установлению связи этих систем отсчета, их калибровке, компенсации погрешностей и анализу точности.

На рис. 1 изображена идеализированная схема систем координат. Плоскопараллельные перемещения каретки К с закрепленным на ней носителем изображения измеряются двумя лазерными интерферометрами ЛИ₁ и ЛИ₂, установленными под углом $\pi/2$, показания которых используются для построения прямоугольной системы координат X, Y, связанной со столом «Зенита». С точки зрения пользователя удобнее всего работать в системе координат x, y, связанной с кареткой и в конечном счете с исследуемым изображением. Так как оси x, y параллельны осям X, Y, все перемещения каретки, измеренные интерферометрами в системе X, Y, переносятся в систему x, y. Остается связать с этой системой координаты ξ, η сканирующего раstra. Конструктивно сканирующая система жестко связана со столом, оси координат ξ, η проекции S раstra на плоскость изображения параллельны осям X, Y (а следовательно, и осям x, y). Для связи координат достаточно фиксировать одну точку в обеих системах, например начало координат O проекции раstra, т. е. начало координат системы ξ, η . Координаты x', y' этой точки в системе x, y определяются отсчетами лазерных интерферометров. Произвольная точка ξ, η раstra имеет в системе x, y координаты

$$x'' = x' + m_{\xi}\xi; \quad y'' = y' + m_{\eta}\eta.$$

Однако изображенная на рис. 1 идеализированная связь координатных систем искажается погрешностями технологического характера. Реальная ситуация (в утрированном виде) приведена на рис. 2. Погрешность установки интерферометров и измерительных направляющих приводит к неортогональности системы x, y. Направляющие даже при самом тщательном изготовлении имеют дефекты, которые при перемещениях каретки проявляются как непрямолинейность координатных осей x и y. Обратим внимание на то, что система координат x, y определяется расстояниями d_1 и d_2 от точек установки лазерных интерферометров до отражателей, контактирующих с измерительными направляющими Н₁ и Н₂ (см. рис. 1). Поэтому, несмотря на наличие в конструкции прибора нескольких механических направляющих, по которым перемещается каретка, в отсчет координат входят погрешности только измерительных направляющих.

Система координат X, Y характеризуется высокой равномерностью масштабов по осям, так как отсчеты в ней базируются на счете числа порядков интерференции лазерного луча. О системе ξ, η этого сказать нельзя. Дисторсия и погрешности установки объектива, проектирующего сканирующий растр на плоскость изображения, приводят к непостоянству масштаба по полю сканирования, вследствие чего структура растра искажается. Кроме того, из-за погрешностей установки сканирующей системы координатные оси ξ, η могут быть повернуты относительно осей x, y .

В точных измерительных машинах (например, в координатно-измерительной машине «Ascogecord») для измерения кривизны направляющих используется в некотором роде «эталон прямолинейности» — туго натянутая нить. Весьма заманчиво в фотограмметрическом автомате осуществить калибровку, используя в качестве эталона равномерность шкал лазерных интерферометров, не прибегая к помощи каких-либо внешних эталонов. Такая возможность имеется, она обеспечивается наличием двух независимых систем отсчета координат, которые можно связать через изображение, находящееся в поле зрения сканирующей системы. Например, масштаб сканирующей системы можно легко измерить, поместив в поле зрения сканирующей системы произвольное изображение $\tau(\xi, \eta) \neq \text{const}$, допустим контрастную линию L (см. рис. 2). Произведя сканирование вдоль некоторой координатной линии $\eta = \text{const}$ и обрабатывая полученную информацию, вычислим координату какой-либо точки сечения линии L направлением сканирования, например центр масс M функции $\tau(\xi, \eta)$ на интервале внутри линии. Эту процедуру можно повторить после перемещения линии движением каретки, когда она займет положение L' . Тогда получаем одно и то же перемещение, измеренное дважды: лазерными интерферометрами (ΔX) и сканирующей системой ($\Delta \xi$). Их отношение дает величину масштаба сканирующей системы на данном отрезке $m_\xi = \Delta \xi / \Delta X$. Шаг перемещения каретки может выбираться очень малым — до 0,32 мкм. Это позволяет весьма детально исследовать структуру растра, производя измерения масштабов для семейства координатных линий

$$\eta = \{c_1, c_2, \dots\},$$

где c_i — различные константы. На рис. 3 представлены результаты измерения масштаба сканирующей системы для одного из сменных объективов, полученные описанной процедурой при наладке системы.

При измерении масштаба изображение перемещается только по координате x ; понятно, что к линии L не предъявляются жесткие требования в смысле прямолинейности. Всякий раз сканирование производится вдоль одной и той же координатной линии $\eta = \text{const}$. Кривизна линии L внесет в масштаб только погрешность, обусловленную малым сдвигом $\delta \eta$ точки пересечения M , происходящим из-за непрямолинейности направляющей оси x и координатной линии $\eta = \text{const}$. Если $\eta = f(\xi)$ — уравнение геометрического места центров масс линии L , то погрешность $\delta \xi$ измерения координаты ξ точки M равна $\delta \eta / f'(\xi)$. Следовательно, от линии L требуется только «гладкий» характер ее поведения, отсутствие резких изломов. В качестве такой линии может использоваться царапина на эмульсии, протяженная граница какого-нибудь объекта, вообще произвольная неоднородность функции $\tau(\xi, \eta)$.

Достоинство описанного способа заключается в том, что масштабы по осям ξ, η приводятся к системе X, Y , основанной на измерениях лазерных интерферометров. Однако для завершения задачи исследования структуры растра нужно еще измерить кривизну самих координатных осей ξ, η . Кривизна осей ξ, η может быть измерена совместно с непрямолинейностью измерительных направляющих x, y следующим способом.

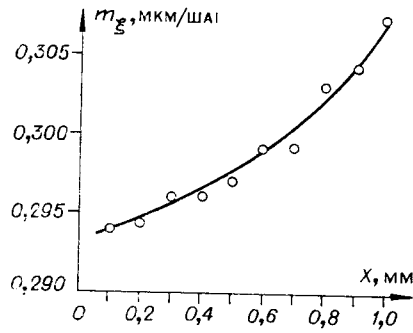


Рис. 3.

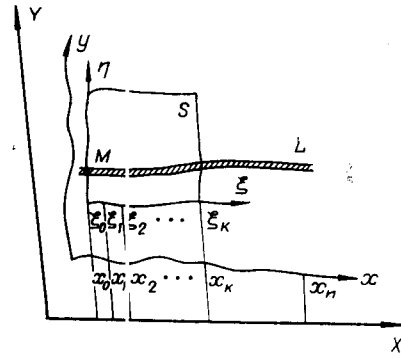


Рис. 4.

Представим ось ξ в виде дискретной функции, заданной в точках с постоянным интервалом $\delta: \eta_0, \eta_1, \dots, \eta_k$; с тем же шагом зададим ось $x: x_0, x_1, \dots, x_n$. Поставим начало сканирующей системы в какое-нибудь стандартное положение относительно системы x, y , например, установим каретку в крайнее положение по оси X (рис. 4). Считыванием по линии $\xi = \xi_0$ с последующей обработкой и перемещением каретки совместим точку M линии L , находящейся в поле сканирующей системы, с точкой ξ_0 . Производя в этом положении каретки сброс счетчиков интерферометров и добиваясь совместным действием системы перемещения и сканирующей системы движения точки M вдоль оси ξ , со счетчиков интерферометров снимаем значения суммарных отклонений обеих осей

$$\varepsilon_1 + \delta_1, \varepsilon_2 + \delta_2, \dots, \varepsilon_k + \delta_k,$$

где δ_i — дефект измерительной направляющей в точке x_i , ε_i — погрешность оси ξ в i -й точке. Повторим ту же операцию, но взяв в качестве стартового положение каретки в соседней точке. Получим ряд величин

$$\varepsilon_1 + \delta_2, \varepsilon_2 + \delta_3, \dots, \varepsilon_k + \delta_{k+1}.$$

Продолжим этот процесс до исчерпывания всей оси x и объединим результаты в матрицу (размерность которой, очевидно, равна $(n-k) \times k$)

$$\Delta = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 + \delta_1 & \varepsilon_2 + \delta_2 & \dots & \varepsilon_k + \delta_k \\ \varepsilon_1 + \delta_2 & \varepsilon_2 + \delta_3 & \dots & \varepsilon_k + \delta_{k+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \varepsilon_1 + \delta_{n-k+1} & \varepsilon_2 + \delta_{n-k+2} & \dots & \varepsilon_k + \delta_n \end{pmatrix}.$$

Вычитая подходящим образом элементы различных строк матрицы, получаем приращения:

$$\begin{cases} \varepsilon_2 - \varepsilon_1, \varepsilon_3 - \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_{k-1} - \varepsilon_{k-2}, \varepsilon_k - \varepsilon_{k-1} & (n-k-1 \text{ реализаций}); \\ \varepsilon_3 - \varepsilon_1, \varepsilon_4 - \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_k - \varepsilon_{k-2} & (n-k-2 \text{ реализаций}); \\ \dots & \dots \\ \varepsilon_{k-1} - \varepsilon_1, \varepsilon_k - \varepsilon_2 & (n-2k+2 \text{ реализаций}); \\ \varepsilon_k - \varepsilon_1 & (n-2k+1 \text{ реализаций}). \end{cases}$$

Совместной обработкой этой совокупности разностей получим истинное положение оси ξ в системе X, Y . Точно так же из матрицы Δ получается система приращений, описывающая дефекты направляющей оси x . Она полностью аналогична предыдущей системе, отличие состоит только в ином количестве получаемых реализаций.

Таким образом, отсчеты в системах x, y и ξ, η с исправленными погрешностями приводятся в систему координат X, Y . Остается компенсировать только погрешность угла между направлениями лучей интерферометров (неортогональность системы X, Y). Эта погрешность может быть вычислена известным способом по результатам измерений координат множества точек фотопластинки при различных поворотах последней. В работе [2] описан еще один способ измерения углов между осями, основанный на построении фотограмметрическим автоматом специальных изображений посредством движения луча сканирующей системы и перемещения каретки с экспонируемой фотопластинкой.

Специальное математическое обеспечение — развивающийся раздел математического обеспечения, состоящий из алгоритмов, предназначенных для решения конкретных задач обработки изображений для различных областей науки и техники. Разработанные к настоящему времени алгоритм автоматического измерения координат изображений звезд на астронегативах и звездных величин, алгоритм отслеживания линейчатых изображений, алгоритм автоматической обработки цитологических препаратов подробно освещены в публикуемых ниже статьях настоящего выпуска. Сюда же включены специальные работы, посвященные анализу распределения энергии в считывающем пятне сканирующей системы, построению стандартных процедур считывания изображений и объектов с выпуклыми границами, и ряд работ из примыкающих разделов математической статистики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурый Л. В., Коронкевич В. П., Нестерихин Ю. Е., Нестеров А. А., Пушной Б. М., Ткач С. Е., Щербаченко А. М. Прецизионный фотограмметрический автомат. — «Автометрия», 1974, № 4, с. 83—89.
2. Прецизионная система ввода, обработки и хранения экспериментальных данных, зарегистрированных на фотоматериалах. Раздел: Математическое обеспечение. — Отчет ИАиЭ СО АН СССР. Новосибирск, 1976.

Поступила в редакцию 28 января 1977 г.

УДК 007.681.327.12 : 681.7.014.3 : 528.72

В. С. КИРИЧУК, В. П. КОСЫХ, Г. И. ПЕРЕТЯГИН
(Новосибирск)

ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕТОВОГО ПОТОКА В СЧИТЫВАЮЩЕМ ЛУЧЕ СКАНИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Введение. При анализе элементов изображений довольно часто возникают ситуации, когда размеры этих элементов одного порядка с размером луча в считывающей апертуре. В этом случае выходное (считанное) изображение всегда представляет собой существенно искаженную копию изучаемого объекта на входе. Действительно, пусть изображение (в плоскости фотонесителя) описывается функцией $f(x, y)$; $h(u, v)$ — апертурная (передаточная) функция считывающего луча. Тогда выходное значение в точке (ξ, η) равно

$$g(\xi, \eta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) h(x - \xi, y - \eta) dx dy.$$