

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
А В Т О М Е Т Р И Я

№ 1

1994

УДК 535.8 : 535.242.2

**Р. Р. Бикматов, М. П. Гришин, Ш. М. Курбанов, В. П. Маркелов,  
Б. И. Олейников, Н. Л. Святославский, Т. А. Святославская**

(Москва)

ных полутоновых изображений, зарегистрированных на фотопленках и фотопластинках. Комплекс построен на основе автоматического микроденситометра (АМД) с двухкоординатной плоскостной разверткой, обеспечивающего формат поля сканирования 250 × 250 мм, координатную точность не хуже 10 мкм, диапазон измерения оптической плотности 0—3 Б с дискретностью 0,01 Б. Комплекс обеспечивает оцифровку фотоизображений с разрешением 10—100 мкм и производительностью до 16 строк/с. Приведены и описаны функциональные схемы многоканальной фотометрической системы и блока управления для АМД. Описаны структура и функции программного обеспечения комплекса, включающего программы ввода, преобразования и визуализации изображений, тестовые программы, программы измерения метрологических параметров АМД. Описаны система метрологического обеспечения комплекса и используемые поверочные средства.

**Введение.** Широкое распространение фотографических методов исследований в различных областях науки и техники вызвало необходимость создания специализированных устройств для автоматизированного дешифрирования и обработки экспериментальной информации в виде полутоновых фотоизображений.

Ниже описывается разработанный авторами автоматизированный микроденситометрический комплекс (АМК) для анализа черно-белых полутоновых фотоизображений, планируемый к серийному выпуску на базе автоматических микроденситометров АМД-1БЦМ.

Комплекс предназначен для проведения любых работ, связанных с анализом информации, зарегистрированной на фотографических материалах (анализ рентгеновских снимков, интерферограмм, дешифрирование аэрофотоснимков, контроль разнообразных фотошаблонов и технологических масок, измерение параметров фотоматериалов). Высокая координатная точность измерений удовлетворяет требованиям фотолитографии и позволяет обеспечить автоматизированный контроль фотомасок.

Производительность комплекса существенно выше производительности серийных образцов автоматических микроденситометров плоскостного типа и приближается к производительности барабанных систем, сохраняя при этом все преимущества плоскостных систем: удобство установки и закрепления снимков различных форматов, хорошие условия визуального просмотра установленного снимка, возможность работы как с пленками, так и с фотопластинками\*.

\* Бикматов Р. Р., Гришин М. П., Курбанов Ш. М. и др. Система автоматической обработки экспериментальной фотоинформации в виде черно-белых и цветных полутоновых изображений // Иконика. Цифровая обработка изображений: Сб. научн. тр.—М.: Наука, 1989.

Состав комплекса. В состав АМК, предназначенного для обработки изображений больших форматов, входит устройство ввода фотоизображений — автоматический микроденситометр АМД-2 с управлением от специализированного процессора, персональная ЭВМ (типа IBM PC AT/386 или AT/486 с графическим адаптером VGA или SVGA) для обработки данных и лазерный принтер высокого разрешения. Структурная схема комплекса приведена на рис. 1.

Управление АМД обеспечивается спецпроцессором по командам персональной ЭВМ (ПЭВМ), передаваемым через контроллер связи в начале считывания изображения. В процессе сканирования данные передаются в ОЗУ ПЭВМ по каналу прямого доступа, а процессор ПЭВМ выполняет только операции обработки и записи данных на НМД.

Комплекс обеспечивает управляемое от ПЭВМ автоматическое двухкоординатное построчное и растровое сканирование, выделение и измерение оптической плотности элементов изображения, ввод информации в виде значений оптической плотности и координат элементов в память ПЭВМ и ее последующую обработку при помощи программ пакета обработки изображений.

Технические характеристики АМК. Диапазон измерения эффективных оптических плотностей черно-белых фотоизображений от 0,01 до 3,00. Погрешность измерения оптической плотности в диапазоне: от 0,02 до 1,80 не более 0,02, от 1,80 до 3,00 не более 0,04. Дискретность отсчета оптической плотности 0,01. Рабочее поле сканирования 240 × 240 мм. Дискретность отсчета координат при сканировании 1 мкм. Координатные погрешности сканирующего стола, не более: систематические — 20 мкм на длине 100 мм, случайные — 5 мкм. Максимальная скорость сканирования 50 мм/с. Увеличения оптической системы — 10<sup>x</sup>, 25<sup>x</sup>, 50<sup>x</sup>, 100<sup>x</sup>. Размеры фотометрируемого элемента 10, 20, 40, 100 мкм. Число каналов фотометрирования 16.

Принцип работы микроденситометра. Автоматический микроденситометр АМД-2 включает в себя: систему сканирования, состоящую из двухкоординатного плоскостного стола с шаговыми двигателями, оптическую систему для формирования изображения фотоносителя, многоканальную фотометрическую систему (МФС) и блок управления.

Исследуемое фотоизображение закрепляется на предметном стекле сканирующего стола микроденситометра. Сканирование осуществляется при перемещении сканирующего стола по обеим координатам. Выделение элемента изображения производится с помощью проекционной оптической системы типа микроскопа со сменным увеличением, проецирующей увеличенное изображение участка фотоматериала на многоэлементный фотоприемник (МФПУ). Освещение проецируемого участка изображения осуществляется осветительной оптической системой. В качестве источника света использована дуговая ксеноновая лампа типа ДКсШИЛ-150. Измерение оптической плотности выделенного растр-элемента производится многоканальной фотометрической системой.

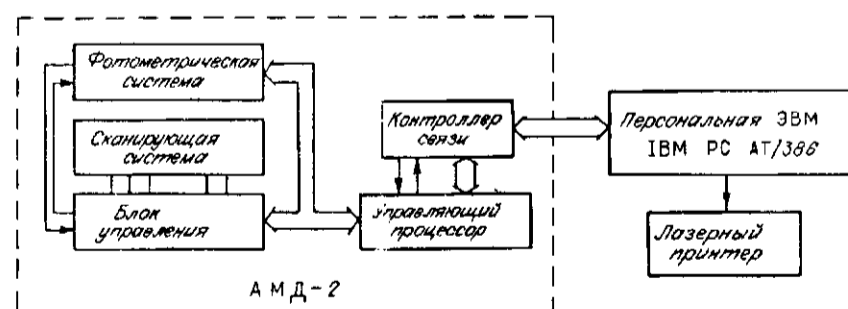


Рис. 1

Размер измеряемого элемента изображения определяется фиксированным размером элементов МФПУ и увеличением проекционной оптической системы. Изменение увеличения производится заменой микрообъектива. Подсветка широкого поля изображения, просмотрный экран и окуляры предназначены для ориентирования изображения относительно осей сканирования.

**Фотометрическая система.** Многоканальная фотометрическая система микроденситометра построена на базе кремниевой многоэлементной фотодиодной линейки с отдельными выводами типа ФД-304. Функциональная схема МФС приведена на рис. 2.

Электронная часть МФС построена по двухдиапазонной схеме, при которой диапазон измерения оптической плотности 0—3 Б разбивается на два поддиапазона: 0—1,5 и 1,5—3 Б. Используемый быстродействующий 10-разрядный АЦП обеспечивает измерение оптической плотности с дискретностью не хуже 0,01 Б. Компенсация колебаний яркости источника света обеспечивается опорным каналом, выходной сигнал которого подается на вход опорного напряжения АЦП.

МФС включает 16 (по числу элементов МФПУ) предварительных усилителей, построенных на ОУ 544УД1 и К140УД17, аналоговый коммутатор (АК1) для коммутации каналов, опорный канал, состоящий из фотоприемника (ФПО) и предусилителя (ПУ0).

Выходной сигнал с коммутатора каналов АК1 подается на схему переключения поддиапазонов, состоящую из компаратора (К), диапазонного усилителя (ДУ), аналогового коммутатора (АК2). Опорный сигнал на схему переключения подается с выхода опорного канала через делитель (Д). Выходной сигнал схемы подается на вход АЦП типа 1108ПВ1.

Преобразование выходного кода МФС в код оптической плотности производится с помощью ПЗУ, расположенного в устройстве управления фотометрированием (УУФ) и имеющего 11 разрядов адреса и 9 разрядов выходного кода оптической плотности. УУФ обеспечивает управление работой АЦП и коммутатора каналов 16-канальной МФС, прием и преобразование кода МФС в код оптической плотности, буферизацию данных, управление процессом передачи данных в ЭВМ по каналу ЦДП, управление индикатором плотности прибора.

По сигналу «Запуск» из блока управления микроденситометра производится поочередное подключение всех каналов коммутатором АК1 к входу последующей схемы и запуск АЦП. (Элемент  $dT$  формирует временную задержку запуска.) По сигналу КПР («Конец преобразования АЦП») происходит запись кода в регистровый буфер и переключение кода канала, поступающего на АК1. Выбор поддиапазона осуществляется в начале каждого цикла измерения по сигналу компаратора, фиксируемого на время измерения триггером (Т). По окончании опроса всех 16 каналов УУФ выставляет сигнал «Запрос» и передает данные из буфера в память ПЭВМ.

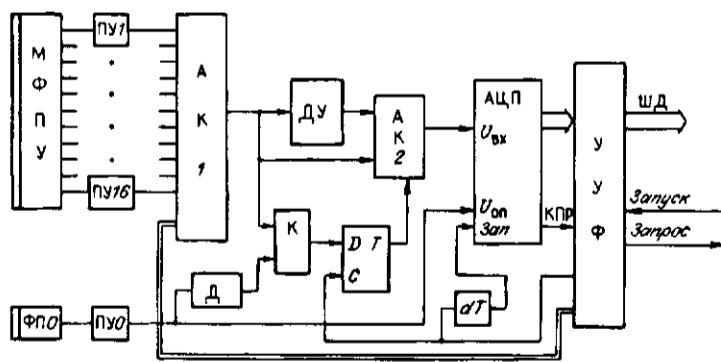


Рис. 2

Для исключения пространственного сдвига измеряемых элементов изображения запуск АЦП может быть синхронизован с сигналами датчика перемещения, а входное окно МФПУ соответственно смещено таким образом, что момент запуска АЦП для каждого канала соответствует одной и той же координате элемента изображения для всех каналов. Разброс чувствительности элементов МФПУ корректируется программно.

Применение описанной МФС в микроденситометре позволило существенно повысить производительность комплекса при вводе изображений с пространственным разрешением 25 мкм и более (20 пар лин./мм и менее).

**Блок управления.** Управление перемещениями сканирующего стола с шаговыми приводами обеспечивается блоком управления со специализированным процессором. Программное управление сканированием реализуется путем слежения за значениями текущих координат стола и переключения режимов работы системы сканирования в соответствии с текущим состоянием прибора и требуемыми параметрами раstra по определенному алгоритму. Параметры раstra передаются в память управляющего процессора.

Блок управления содержит двоично-десятичные счетчики координат X и Y (СКX и СКY) с индикатором координат на передней панели, устройство управления сканированием (УУС) с программируемыми делителями частоты (ПДЧX и ПДЧY) и счетчиком перемещения (СП), по обнулению которого вырабатывается сигнал «Запуск» для МФС. Каждый режим задается из процессора через регистр управления (РУ). Функциональная схема блока управления приведена на рис. 3.

Программа управления сканированием обеспечивает работу привода по каждой координате в двух режимах: слежения и сканирования. В режиме слежения узел управления сканированием удерживает стол в заданной координате, образуя вместе с датчиком перемещения (ДПЛ) следящую систему по перемещению. Дискретность отсчета перемещения стола 1 мкм. Для управления шаговыми двигателями стола используются коммутаторы с электронным дроблением основного шага (КШД). Двигатели соединены со столом через передачу «ходовой винт — гайка».

Перед началом сканирования загружаются программируемые делители частоты и счетчик перемещения (с автозагрузкой). Генератор (Г) задает входную частоту для ПДЧ, используемых для программного изменения управляющей частоты шагового привода стола (регулирования скорости перемещения стола). СП отсчитывает интервал перемещения между двумя соседними измерениями оптической плотности. По выходному сигналу СП вырабатывается сигнал «Запуск», запускающий систему фотометрирования прибора.

Для отслеживания перемещения стола в противоположном направлении используется узел управления счетчиком (УУСП). Величина этого перемещения запоминается, а СП блокируется до тех пор, пока это отклонение не будет выбрано.

При сканировании слежение за координатой стола и определение точки начала торможения производятся процессором программно. После прохода столом точки начала торможения скорость перемещения стола плавно снижается до минимальной. В начале последнего перемещения программно устанавливается режим слежения, и по окончании этого перемещения блок управления переходит в режим слежения.

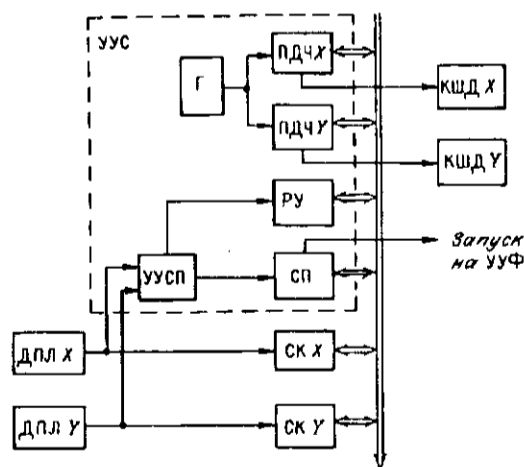


Рис. 3

Примененный принцип построения блока управления обеспечивает независимость координатной системы сканируемого изображения от возможных сбоев программ управления, малый объем аппаратной части и гибкость программного управления, надежность прибора.

Программное обеспечение комплекса. Программное обеспечение комплекса АМК обеспечивает управление комплексом, метрологическую поверку прибора и тестирование его работоспособности, организацию и ведение базы данных (изображений), обработку изображений в ЭВМ, визуализацию изображений, документирование обработанных изображений.

Программа управления вводом обеспечивает работу АМК во всех штатных режимах. В интерактивном режиме задаются параметры сканирования: координаты начала и конца кадра, количество отсчетов в строке, шаг и скорость перемещения системы сканирования. Для многоканальной системы фотометрирования в ЭВМ предварительно производятся калибровка каналов для поканального выравнивания чувствительности и сортировка данных. Запись считываемого изображения осуществляется в архив на жестком диске ЭВМ, допускающем занесение изображений произвольных форматов и типов данных (байтовых, целых, действительных, комплексных). Изображение снабжается аннотацией.

Тестовое программное обеспечение реализует проверку работоспособности прибора методом анализа правильности отработки им заданных режимов с выводом результатов тестирования на дисплей оператора.

Программы измерения метрологических характеристик прибора АМК позволяют в автоматическом режиме производить оценку точности измерения оптической плотности, измерение функции передачи модуляции прибора, оценку координатных погрешностей его системы сканирования.

Программное обеспечение обработки изображений представляет собой открытый для дополнения другими программами пакет программ. С его помощью реализуется широкий круг типичных операций обработки изображений: поэлементное преобразование, оценка статистических характеристик, повышение контраста, линейная, медианная и другие виды фильтрации, свертка с ядром произвольной формы, сдвиг и транспонирование изображений, прямое и обратное преобразование Фурье и т. д. Размерность изображения произвольная и имеет верхнюю границу  $4000 \times 4000$  элементов.

Обработанные изображения визуализируются на экране монитора ЭВМ (в случае использования IBM PC/AT с VGA- или SVGA-монитором) или на специализированном цветном полутоновом дисплее. В первом случае вывод может осуществляться специализированным пакетом программ в одном из стандартов или программой вывода в стандарте, принятом для архива изображений. Во втором случае используется программное обеспечение обработки изображений на цветном полутоновом дисплее. Последнее включает в себя программы генерации загружаемых таблиц для реализации аппаратных функций обработки непосредственно на дисплее: выделение фрагментов изображения в границах произвольной формы, отображение функции преобразования яркости в каждом из цветовых каналов, псевдораскрашивание, сложение двух изображений и т. п.

Работой этих программ управляет программа вывода изображений на полутоновый дисплей, которая позволяет реализовать все функции дисплея, в первую очередь загрузку изображений форматом до  $512 \times 512$  элементов в память дисплея, отображение содержимого памяти на экран дисплея с табличным преобразованием, сдвиг изображения, чтение координат маркера и управление трекболлом, отображение графической и символьной информации в произвольном цвете.

Описанное программное обеспечение реализовано на IBM PC/AT в ОС MS-DOS v4.01 на языке Си и позволяет потребителю реализовать решение широкого круга задач обработки изображений на ЭВМ с полным использованием возможностей автоматического микроденситометра АМК-2 как прецизионного скоростного устройства ввода фотоизображений в ЭВМ. Достигнутая производительность комплекса составляет в среднем 30—40 тыс.

отсчетов/с, что сравнимо с производительностью барабанных систем ввода изображений.

**Метрологическое обеспечение комплекса.** Микроденситометр АМД-2 имеет три основные системы, характеристики которых прямо влияют на результаты измерений (оптическая, сканирующая и фотометрическая).

Оптическая система характеризуется функцией передачи модуляции (ФПМ), определяющей максимально возможное пространственное разрешение и перепад плотностей при сканировании объекта с различной пространственной частотой. Определение ФПМ производится сканированием штрихов стандартной миры ГОИ с частотами от 6 до 50 лин./мм.

Сканирующая система характеризуется координатными погрешностями, вызывающими геометрические искажения изображения или смещение линий в спектрограммах. Определение координатных погрешностей производится путем измерения на микроденситометре координат точек тестового объекта, истинные координаты которых известны с большой точностью.

В качестве такого объекта используется координатная сетка, нанесенная на стеклянной пластине и имеющая кресты нитей, расположенные с шагом 40 мм по обеим координатам. Координаты крестов измерены на координатно-измерительной машине «Аскорекорд» с точностью не хуже 1 мкм.

Фотометрическая система характеризуется диапазоном измерения оптической плотности и погрешностью измерения плотности, которая может быть разделена на систематическую и случайную составляющие. Для определения погрешности фотометрической системы используется набор стеклянных образцов оптической плотности, аттестованных на денситометрической установке высшей точности.

**Заключение.** Разработанный комплекс позволяет реализовать в интерактивном режиме обработку градиционных черно-белых фотоизображений для широкого круга задач (дешифрирование аэро- и космических фотоснимков, анализ интерферограмм, рентгеновских снимков, определение параметров фотоземли, аттестация различных технологических фотомасок, фотошаблонов и др.). Комплекс обеспечивает наивысшие фотометрическую и координатную точность измерений по сравнению с приборами ввода и анализа изображений других типов при достаточно высокой производительности.

*Поступила в редакцию 4 февраля 1993 г.*