

*АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ*  
**ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОГО АВТОМАТА «ЗЕНИТ»**

УДК 528.7 : 778.35 : 522.61 : 771.534 : 531. : 429 : 621.391 : 681.515.8

**Ю. Е. НЕСТЕРИХИН, Б. М. ПУШНОЙ**  
(Новосибирск)

**О СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Развитие оптических методов исследования, в частности когерентной оптики и голографии, существенно расширило возможности регистрации данных в виде изображений и, в свою очередь, повысило интерес к методам обработки и синтеза изображений с помощью электронных вычислительных машин.

В статьях, помещенных в этом номере журнала, рассматриваются некоторые технические и алгоритмические аспекты направления в области автоматизации обработки изображений, развиваемого в течение нескольких лет в Институте автоматизации и электрометрии СО АН СССР. Здесь мы охарактеризуем основные особенности этого направления.

К проблеме анализа изображений приводит любая научная или прикладная задача, связанная с объектами или явлениями, распределенными в пространстве. Можно перечислить несколько областей, где анализ изображений занимает важное место.

1. Оптическая астрономия, астрофизика, астрометрия.
2. Физика элементарных частиц, регистрация, анализ и измерение треков.
3. Космические исследования поверхности планет.
4. Аэрокосмическая фотосъемка земной поверхности, картирование, исследование природных ресурсов.
5. Микробиологические исследования, гистология.
6. Кристаллография, рентгеноструктурный анализ.
7. Газовая динамика.
8. Оптическая технология, методы контроля качества поверхностей.
9. Микроэлектронная технология.
10. Разработка запоминающих устройств большой емкости.

Универсальным способом регистрации изображений является фотография, которую следует рассматривать как своеобразное запоминающее устройство, из которого извлекается информация в ходе последующей обработки. Изображение представляет собой двумерную функцию, выраженную вариациями одного или нескольких параметров фотографического носителя. Сущность обработки изображений состоит в проведении разного рода преобразований этой функции. При этом результат обработки не всегда является изображением. Очень часто требуется получить определенные числовые характеристики объекта исследования, статистические характеристики совокупности объек-

тов, определить количество объектов с заданными признаками, найти их распределение в пространстве и т. п.

Результатом обработки часто является схематическое изображение. Примером может служить изготовление топографических карт с использованием аэрофотоснимков местности. По существу, к составлению схемы изображения сводится задача получения аналитического описания изображений, часто встречающаяся в практике научных исследований, хотя здесь обычно не возникает необходимости в графическом воспроизведении результатов. Наконец, важное практическое значение имеет обработка с целью улучшения изображений, предназначенных для зрительного восприятия: повышение четкости, выравнивание контрастности, устранение различных искажений, дефектов и подавление помех. При этом обычно исходное изображение считается полностью и, по существу, в ходе обработки воссоздается заново во всех деталях.

Основные трудности при обработке изображений связаны с их большой информационной избыточностью. Обусловлена она в первую очередь свойствами реальных изображений. Разрешающая способность системы регистрации, непосредственно определяющая ее информационную емкость, реализуется лишь в относительно немногих точках реального изображения: на мелких деталях и резких границах. Основная часть площади изображения занята гладкими участками. Кроме того, величина избыточности определяется содержанием задачи обработки и ее конкретной целью. Во всех случаях представляется возможным указать критерии выделения информативных точек или областей на изображении. Не всегда эти критерии достаточно эффективны и не всегда поддаются алгоритмизации. Это затрудняет подход к оценке избыточности с общих позиций, однако на любом практическом примере можно убедиться в том, что избыточность изображений чрезвычайно велика. Конечно, возможно использование избыточности для снижения вредного влияния различных погрешностей в той мере, в какой она обусловлена наличием функциональных и статистических зависимостей между элементами изображения. Но очень часто встречаются случаи, когда избыточная информация не может принести никакой пользы, поскольку она принципиально не связана с объектом исследования. Примером могут служить снимки звездного неба, на которых изображения звезд занимают крайне малую часть общей площади.

Избыточность приводит к бесполезным затратам времени при вводе информации со снимка в ЭВМ, загружает память ЭВМ излишними данными, которые в ходе дальнейшей обработки не могут быть использованы. Избыточность особенно неприятна в системах, работающих со снимками большого формата с высоким разрешением. Например, в практике астрономических исследований используются фотопластинки форматом  $300 \times 300$  мм<sup>2</sup>. Изображения звезд на снимках могут иметь диаметр примерно от 500 до 15 мкм. Для измерения координат звезд, их звездной величины, определения спектральных классов и т. п. необходимо использовать сканирующий денситометр с апертурой порядка  $1 \times 1$  мкм<sup>2</sup>. При этом обычно показания денситометра выражаются десятизначным двоичным числом. Нетрудно сосчитать, что с такой фотопластинки можно получить массив данных объемом в  $10^{12}$  бит. Для его размещения во внешней памяти ЭВМ необходимо около 2000 магнитных лент. При обычной скорости записи (64 кбайт/с) для этого требуется  $2 \cdot 10^6$  с, или 600 ч. Эти цифры показывают, что обработка фотографических изображений высокого разрешения без учета избыточности практически невыполнима. Непосредственный ввод изображений во внешнюю память ЭВМ возможен при решении задач улучшения изображений, предназначенных для визуального восприятия, так как здесь обычно допустима обработка с пониженным разрешением. Вместе с тем

сравнение информационной емкости фотографических носителей с емкостью внешних устройств современных ЭВМ показывает, насколько эффективным может оказаться оптическое запоминающее устройство, используемое, например, в качестве архивного.

Общий принцип уменьшения избыточности сводится к введению в систему обработки дополнительных данных о том, как распределена на изображении полезная информация, к вводу в программу обработки аппроксимирующих соотношений, позволяющих увеличить пространственные интервалы между измерениями на гладких участках снимка, наконец, к формированию в памяти ЭВМ набора типовых элементов, каждый из которых достаточно часто встречается на обрабатываемых изображениях. В последнем случае дело сводится к поиску на изображении элементов, похожих на типовые, и к такому преобразованию типовых элементов (поворот, сжатие — растяжение и т. п.) и соответствующему их размещению, чтобы они в совокупности давали требуемое приближение к исходному изображению. При составлении программ обработки эти приемы используются в самых различных сочетаниях.

Первый способ принципиально самый простой, но может применяться лишь в особых случаях. Например, координаты звезд на астронегативе легко вычисляются по данным звездных каталогов. Достаточно осуществить «привязку» нескольких звезд, чтобы координаты всех остальных были вычислены с точностью, исключающей возможность их потери или перепутывания при считывании. В этом случае сканировать астронегатив по всей площади нет необходимости. Точно так же задача автоматического поиска дефектов изображения на фотошаблоне интегральной микросхемы облегчается, если в память ЭВМ заранее введен чертеж шаблона и по этим данным ведется управление избирательным вводом.

При обработке интерферограмм не представляется возможным ввести заранее в память ЭВМ форму и расположение интерференционных полос. В этом случае находит применение аппроксимация закона изменения почернения рядом Фурье. Необходимое для этого количество измерений почернения определяется требуемым качеством приближения аппроксимирующей функции к исходной интерферограмме. Аппроксимирующая функция экстраполируется на соседний участок изображения, и в произвольной точке делается измерение плотности. Если результат измерения близок к предсказанному экстраполяцией значению, он используется для уточнения аппроксимации и осуществляется новая аппроксимация. Интервал экстраполяции делается переменным и ставится в зависимость от ошибки предсказания. Основанным на таком принципе следящим, адаптивным алгоритмам сканирования свойственны некоторые недостатки следящих систем: возможны срывы слежения на участках, где структура фрагментов изображения резко изменяется. Однако при обработке фотографических изображений легко предусмотреть автоматическое возвращение сканирования «назад» и повторение работы на сложном участке с повышенной частотой отсчетов.

Нередко встречаются изображения, в которых информативные элементы рассеяны случайным образом и не представляется возможным найти и сформулировать какую-либо закономерность их размещения. К тому же информативные элементы локализованы, т. е. в окрестности любого такого элемента отсутствуют признаки, указывающие на то, что информативный элемент находится рядом. Такие изображения встречаются на микробиологических препаратах, снимках слабых звезд, отсутствующих в звездном каталоге, и во многих других случаях. Автоматизация обработки изображений этого типа требует применения специальных алгоритмов поиска информативных элементов. Сравнительно просто можно задать многие признаки информативного элемента, кроме его координат на изображении. Всегда можно задать минимальное значение

диаметра элемента и сканировать поверхность снимка в точках регулярной решетки с шагом по обеим координатам, не превышающим минимального диаметра элемента. В простейшем случае достаточно одного измерения плотности в каждой точке. Процедура поиска неизбежно усложняется, если имеются интенсивные шумовые помехи или точки располагаются на фоне переменной плотности и т. п. Но в любом случае применение поисковых алгоритмов позволяет существенно ускорить ввод данных и обработку по сравнению со сплошным считыванием.

По-видимому, наиболее сложные случаи анализа изображений связаны с задачей поиска и выделения элементов, заданных совокупным алгоритмам, работающим медленно и недостаточно достоверно. Наиболее естественный путь практического решения задач обработки изображений с операциями распознавания состоит в организации диалогового режима между ЭВМ, сканирующей системой и оператором. При этом с помощью сканирующей системы и ЭВМ осуществляются измерительные и вычислительные операции, в том числе и часть операций по распознаванию для простых случаев. Оператор осуществляет контроль за функционированием системы и вмешивается в решение сложных вариантов опознавания.

Приведенное выше схематичное и безусловно неполное описание задач обработки изображений позволяет сформулировать некоторые общие требования к технической системе, предназначенной для автоматизации обработки изображений в достаточно широкой области практического применения.

В состав такой системы должна входить электронная вычислительная машина, выполняющая не только функции обработки данных, но и управления сканированием. Сканирующая система должна обеспечивать произвольный порядок считывания изображения, определяемый программой обработки. В отличие, например, от «телевизионных» систем сканирования произвольный доступ ЭВМ к изображению позволяет полностью исключить «перезапись» изображения в машинную память, поскольку работа ЭВМ с изображением, размещенным в памяти, сводится к последовательным обращениям к отдельным элементам, т. е., по существу, к тому же сканированию.

Отсюда непосредственно следует требование высокого быстродействия сканирующей системы, чтобы время обращения к изображению приближалось к времени обращения ЭВМ к оперативной памяти. Таким требованиям может удовлетворить электронно-оптическая система сканирования. Чтобы обеспечить требуемое разрешение оптической системы сканирования и снизить до приемлемых значений погрешности в координатах отсчетов, предусматривается работа оптической системы на небольшом участке изображения. Перемещение поля сканирования по всей площади изображения может быть осуществлено применением механического устройства, к быстродействию которого предъявляются менее жесткие требования.

Система в целом должна обеспечивать разрешение по координатам на уровне современных оптических микроскопов. В соответствии с этим требуется такого же порядка точность выведения сканирующего пятна в заданную точку изображения. Разумеется, все основные операции, связанные со сканированием, должны выполняться автоматически по командам ЭВМ и результаты сканирования поступать в ЭВМ для проведения очередных вычислений без промежуточного накопления. Этими

соображениями определилась общая структура устройства. При выборе конкретных технических характеристик отдельных узлов прибора и принятии конструктивных решений было признано целесообразным ориентироваться на достижение предельно высоких качественных показателей и не ограничиваться требованиями частных задач. Было очевидно, что прибор получится относительно сложным и дорогим. Поэтому обращалось особое внимание на то, чтобы сделать его универсальным, пригодным для решения перспективных задач и развития системы специального математического обеспечения.

Разработка прибора началась в 1969 году и проводилась совместно несколькими лабораториями Института автоматики и электрометрии СО АН СССР при участии СКБ научного приборостроения СО АН СССР. После успешных испытаний первого макета начата промышленная разработка универсальной автоматизированной системы. Эта разработка проводится на основе опыта, накопленного при создании и наладке первого макета, и с учетом технологических требований промышленного производства.

Первый макет, получивший условное наименование «Зенит», имеет следующие параметры и особенности.

Максимальный формат обрабатываемых изображений был выбран равным  $300 \times 300$  мм<sup>2</sup>, что соответствует наибольшему формату фотопластинок, выпускаемых промышленностью для научно-технических целей.

Сканирующая система содержит электронно-лучевую трубку высокого разрешения, позволяющую получить на экране  $4096 \times 4096$  дискретных положений светового пятна практически без перекрытий. С помощью объектива экран ЭЛТ проецируется на обрабатываемый плоский носитель изображения. Размер сканирующего раstra в плоскости изображения можно варьировать в широких пределах сменой объектива. Минимальный размер  $0,5 \times 0,5$  мм использовался при проведении биологических исследований. При этом диаметр сканирующего пятна в плоскости изображения всецело определяется применяемым объективом и оказывается существенно большим минимального шага сканирования, что позволяет анализировать форму пятна и распределение интенсивности света в нем. Эти данные используются при последующей обработке, если требуется улучшить разрешение мелких деталей изображения. Для поддержания точной фокусировки при работе с изображениями большого формата используется пневматическая следящая система.

Каретка с устанавливаемым на ней носителем изображения может перемещаться в горизонтальной плоскости по системе направляющих с помощью электропривода. ЭЛТ системы сканирования установлена неподвижно над кареткой; свет, прошедший сквозь изображение, регистрируется фотоумножителем. Датчиками привода каретки по двум ортогональным координатам служат лазерные измерители перемещения с дискретностью отсчета  $0,32$  мкм, обеспечивающие почти идеальную равномерность шкалы. Это в дальнейшем используется для построения алгоритмов автоматического оценивания кривизны направляющих, их неортогональности, для оценивания дисторсии системы сканирования и введения соответствующих поправок при обработке.

Система управления перемещением каретки может работать в режиме быстрого перевода каретки в точку с заданными координатами и обеспечивать движение с заданной скоростью по гладкой кривой. Минимальная скорость составляет несколько микрон в секунду. Скорость в режиме быстрого перемещения в заданную точку может достигать  $1$  м/с. В этом режиме используется оптимальная по быстрдействию система управления при ограниченном ускорении.

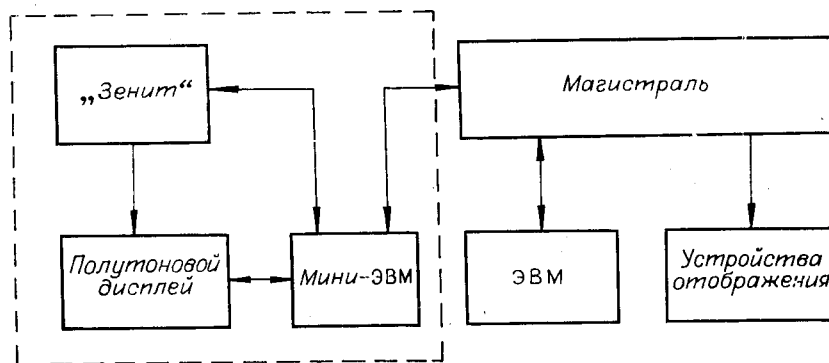
При создании первого макета наибольшее внимание уделялось обработке системы сканирования, электроприводу, системе управления и кинематической схеме механических узлов. Связь с ЭВМ «Минск-22»

была выполнена по традиционным принципам. Она обеспечивала функционирование системы в целом, но не позволяла реализовать потенциальное быстроедействие автомата. Тем не менее на этой системе была проведена отработка программ автоматического анализа астронегативов, биологических препаратов, фотошаблонов интегральных схем и т. п.; проведены эксперименты по синтезу изображений, в частности, удалось построить несколько синтезированных голограмм непосредственно в «оптическом» масштабе; разработан ряд «метрологических» программ автоматического тестирования и калибровки прибора.

Трехлетняя опытная эксплуатация первого макета подтвердила практическую эффективность подобного рода устройств, правильность основных решений, выявила ряд «узких» мест и позволила определить пути развития систем такого типа.

Было признано необходимым увеличить рабочий формат до  $450 \times 450$  мм<sup>2</sup>, поскольку во многих случаях требуется производить совместную обработку нескольких изображений. Появилась возможность использовать более совершенную оптику в системе сканирования. Опыт работы с ЭВМ «Минск-22» показал, что ее быстроедействие явно недостаточно для решения даже не очень высокой сложности задач обработки изображений. Недостаток быстрогодействия проявляется в том, что значительная часть работы связана с отладкой алгоритмов. Для этого требуется ЭВМ, обладающая не только высокой скоростью счета, но и быстрой трансляцией с формального языка и быстрой сборкой, что обеспечивается наличием дисковой операционной системы. При работе отлаженных программ быстроедействие в значительной мере определяется скоростью канала обмена. Время перехода считывающего луча из точки в точку и измерения оптической плотности может быть доведено до нескольких микросекунд. Очевидно, канал связи должен обеспечивать примерно такую же скорость обмена. Обмен байтами не удовлетворяет этому требованию — необходим обмен полным словом. При этом считывание и пропускание должно быть организовано в виде машинной команды ЭВМ, обращающейся к автомату как к ячейке оперативной памяти.

Практические задачи, решаемые с помощью этой системы, как правило, достаточно сложны в алгоритмическом отношении. Это приводит к необходимости развивать техническое обеспечение отладочного режима системы, который должен производиться в форме диалога между системой и оператором. Необходим специальный полутоновый дисплей с многофункциональным световым пером, позволяющий наблюдать как работу алгоритма, так и фрагмент изображения, не введенный в память ЭВМ. Для анализа работы алгоритма в течение длительного времени на большой площади изображения необходим дополнительный визуализатор на запоминающей ЭЛТ. Надо полагать, что для особо сложных задач и при «экстренной» обработке диалоговый режим будет основным.



Наиболее перспективной конфигурацией системы обработки изображений следует считать изображенную на рисунке. Мини-ЭВМ совершенно необходима для настройки и профилактики фотограмметрического автомата; она может взять на себя компенсацию погрешностей координатных систем (метрологическое обеспечение), использоваться как буферная память и, наконец, выполнять стандартные операции обработки небольшого объема. Именно эта ЭВМ должна быть связана с фотограмметрическим автоматом предложенным выше способом. Полупрозрачной дисплей в режиме отображения управляется непосредственно от автомата. В диалоговом режиме он является активным устройством и при помощи его клавиатуры и светового пера оператор через мини-ЭВМ управляет работой алгоритма. Эта часть системы должна рассматриваться как базовый комплект.

Для решения сложных задач система должна расширяться подключением мощной ЭВМ (типа М-4030) и устройствами отображения (графопостроители, дисплей на запоминающей ЭЛТ и пр.). Наиболее целесообразный способ организации расширенной системы — применение стандартной магистральной системы обмена.

Приведенные выше соображения легли в основу разработки нового прибора «Зенит-2», которая проводится в настоящее время в ИАиЭ СО АН СССР.

*Поступила в редакцию 2 февраля 1977 г.*

УДК 681.513.52 : 681.515.8

**Л. В. БУРЫЙ, С. А. КУЗНЕЦОВ, Л. Г. ЛУГОВОВ,  
А. А. НЕСТЕРОВ, Б. М. ПУШНОЙ**

*(Новосибирск)*

### **ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОГО АВТОМАТА «ЗЕНИТ»**

В статье [1] описана автоматическая система ввода изображений в ЭВМ с целью его математической обработки, работающая в режиме непосредственной связи фотограмметрического автомата «Зенит» с ЭВМ. Ввод изображения осуществляется фрагментами с помощью расположенной неподвижно электронно-лучевой трубки высокого разрешения, а доступ к любому фрагменту всего изображения обеспечивается посредством механического перемещения носителя изображения.

**Механическая система автомата.** На рис. 1 приведена конструктивная схема механической системы автомата. Она включает в себя механизм поступательного перемещения фотоносителя и измерительную часть, смонтированные на общем массивном основании 1.

Механизм поступательного перемещения состоит из траверсы 2, установленной на неподвижных направляющих 3 и 4. На траверсе 2 расположена направляющая 5, на которой размещена подвижно рамка 6 с фотоносителем. Положение рамки 6 в горизонтальной плоскости поддерживается закрепленной в ее углу опорой 7, которая скользит по поверхности плиты 8. Таким образом, рамка (вместе с фотоносителем) имеет возможность перемещаться поступательно по двум ортогональным направлениям. Движение рамке сообщают два одинаковых узла привода 9 и 10. Для получения минимального значения момента инерции, приведенного к валу двигателя, в каждом узле привода применен спе-