

жений [2, 4, 5]. Во всех случаях они оказались достаточно эффективными и при простоте алгоритмов выделения границ, обеспечивающей высокую скорость обработки, дали высокую точность оценок.

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. Косых В. П., Чейдо Г. П. Автоматизация астро- и фотометрических измерений.— «Автометрия», 1977, № 3, с. 88—98.
3. Уилкс С. Математическая статистика. М., «Наука», 1967.
4. Киричук В. С., Косых В. П. Восстановление размеров микрообъектов при считывании их конечной апертурой.— «Автометрия», 1977, № 3, с. 108—114.
5. Андрианов Л. А., Киричук В. С., Косых В. П., Чейдо Г. П. Автоматический анализ цитогрaмм.— «Автометрия», 1977, № 3, с. 98—107.

Поступила в редакцию 31 декабря 1976 г.

УДК 621.391 : 681.3.01

**В. П. БУДЯНОВ, С. Н. КАСЬЯНОВА, В. Е. ЛЕСНИКОВСКАЯ,
Б. Н. ЛУЦЕНКО**

(Новосибирск)

НЕКОТОРЫЕ АЛГОРИТМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОГО АВТОМАТА «ЗЕНИТ»

1. Терминология. Под графической информацией будем подразумевать в данной работе линейчатое изображение, зарегистрированное на прозрачном фотоносителе. Изображение может быть темным на светлом фоне — впрод будет именоваться позитивом — или светлым на темном фоне — негатив. К изображению будем относить точки, в которых коэффициент пропускания ниже (для позитива) или выше (для негатива) некоторого уровня. Дополнение к изображению именуется фоном. Термины линия и точка имеют здесь не математический, но физический смысл. Предполагается, что на исследуемом кадре линия может плавно изменять свою ширину в 3—5 раз, иметь самопересечения, разветвления и разрывы, протяженность которых меньше текущей ширины линии. Под шириной линии будем подразумевать длину отсекаемого границами линии отрезка нормали к направлению средней оси, или скелета [1, 2] линии, или аппроксимирующего их отрезка ломаной в данной точке. Средние оси, или скелет изображения, образно определяются с помощью метода степного пожара [1]. Если представить изображение покрытым сухой травой, а фон негорючим и предположить, что огонь возник одновременно по всей границе изображения и распространяется с равномерной скоростью к центру линии, скелет будет образован линией гашения огня. Скелет изображения вместе с функцией гашения (пропорциональной времени достижения фронтом огня данной точки скелета), называемые скелетной парой, дают полное описание объекта. С некоторой условностью можем

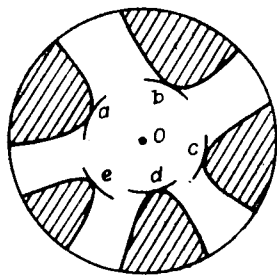


Рис. 1.

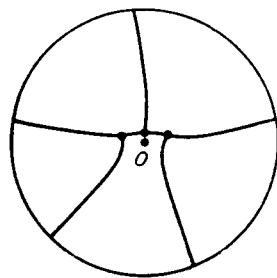


Рис. 2.

считать скелет построенным из математических линий и точек. Пересечением будем называть объединение двух или более линий, обладающих непрерывными первыми производными скелета в зоне объединения. Более общим понятием будет перекресток (рис. 1), включающий в себя разветвления и пересечения или объединение этих событий. Термин *узел* будем использовать в аналогичных ситуациях применительно к скелету изображения. Выделим некоторую область (например, с помощью окружности, как на рис. 1) в окрестности перекрестка. В полярной системе координат ρ, φ с центром в некоторой точке O , принадлежащей изображению, построим зависимость расстояния $\rho(\varphi)$ до границы изображения. Тогда центром перекрестка будем называть центр тяжести всех точек, отвечающих локальным минимумам расстояния от центра перекрестка до границ изображения. Определение рекурсивно и, очевидно, диктует итерационный способ отыскания центра перекрестка. Обратим внимание, что при переходе к скелету изображения (рис. 2) понятие центра перекрестка теряет смысл, так как вероятность пересечения всех линий скелета в одной точке для реального изображения близка к нулю. Отдельные линии, выходящие из перекрестка, будем называть *ветвями*. Если после устранения допустимых разрывов в изображении, не превышающих текущей ширины линии, последняя может быть пройдена без отрыва от изображения, не повторяя ни один из участков дважды, будем называть ее *простой* или *однопроходной*. Цепью условимся называть ломаную, соединяющую в порядке отслеживания последовательность регистрируемых внутренних точек линейчатого изображения. Отдельные отрезки этой ломаной будем называть *звеньями цепи*.

2. Постановка задачи. Рассматриваемая задача связана с получением математического аналога исходного изображения с высокой точностью и рассчитана на использование фотограмметрического автомата «Зенит» (подробнее см. [3—6]). Размеры считывающего луча в автомате «Зенит» таковы, что соседние точки раstra снимаются с существенным перекрытием. Это в некоторой мере служит оправданием того, что далее мы будем предполагать пространство кадра изотропным и пользоваться в алгоритмах, не оговаривая этого особо, евклидовой метрикой. К сожалению, в свое время стремление к универсальности автомата «Зенит» побудило отказаться от аппаратной реализации какого-либо вида следящей развертки [3]. Программная же реализация существующих уже способов электронной следящей развертки [7—9] в нашем случае не вполне целесообразна отчасти из соображений быстродействия, отчасти в силу специфических требований, диктуемых задачами. Требуется построить алгоритм прецизионного автоматического отслеживания и регистрации связного изображения. Желаемая точность должна задаваться оператором и ее понижение должно, естественно, сопровождаться увеличением быстродействия. Изображение считаем связным, если имеющиеся разрывы меньше текущей ши-

рины линии. Размеры сканирующего луча могут быть на порядок (и более) меньше ширины отслеживаемой линии. Учитывая возможность близкого соседства других изображений, желательно осуществлять обход обрабатываемого лабиринта по возможности изнутри, не выходя за его пределы. На первом этапе работы рассматривается обработка лишь одного связанного фрагмента изображения. Вопрос исчерпывания всех связанных компонент кадра пока не рассматривается. Почти не затрагиваются пока и вопросы статистической обработки отслеживаемых линий.

3. Требования к алгоритмам. Как правило, отслеживание и регистрация изображения не самоцель. Полученные данные либо служат исходным материалом для получения оценок некоторых характерных параметров изображения, либо они должны обеспечивать его последующее использование. Кроме того, с помощью той же системы «Зенит», появляются дополнительные ограничения на вид используемой математической модели. В существующем варианте автомата «Зенит» предусмотрено оперативное высвечивание отрезков, задаваемых своими граничными точками. Можно использовать его для репродуцирования. Естественно предъявить к алгоритму отслеживания линий требование обеспечения необходимых для этого исходных данных. Описанные далее алгоритмы предусматривают регистрацию внутренних и граничных точек изображения с регулируемой дискретностью, причем внутренние точки получаемого описания линии в соответствии с введенным выше понятием будем называть цепью. Для прямолинейных участков линий цепь будет совпадать со скелетом, а для участков с малой кривизной будет близка к нему. Но в общем случае (особенно на перекрестках) получаемые точки цепи могут существенно отличаться от точек скелета. Однако получаемая модель линии в виде цепи в нашем случае обладает определенными преимуществами. Исходное изображение при этом может быть аппроксимировано последовательностью непересекающихся трапеций, которые можно равномерно или неравномерно (что проще) покрыть сетью следующих высвечиваемых отрезков. Уменьшая размеры трапеций, будем увеличивать степень приближения к отслеживаемому оригиналу. Повышение точности не связано с качественной перестройкой модели.

Если же использовать для описания отслеживаемого изображения скелетную пару, то в этом случае повышение точности передачи деталей будет сопряжено с качественным изменением модели: появится необходимость вводить боковые ветви скелета, отвечающие, в частности, меньшим значениям скорости гашения; усложнится репродуцирование такого изображения. Вместе с тем эта модель может оказаться предпочтительной при дублировании изображения с помощью системы, использующей иной принцип действия, скажем, с модулируемой апертурой или скоростной спиральной разверткой и высвечиванием изображения в режиме насыщения светочувствительного материала. В случае если края линии сильно зашумлены и ставится задача фильтрации изображения, использование скелетной пары также целесообразно.

Алгоритмы настраиваются при помощи ввода в ЭВМ значений некоторых параметров, характеризующих вид изображения (позитив или негатив), уровень регистрации изображения, минимальную ширину регистрируемого линейчатого изображения, величину допустимых раз-

рывов в изображении, размер области, отводимой для перекрестка, дискретность восприятия изображения, дискретность линейной аппроксимации изображения, признак границы изображения.

В дальнейшем определение некоторых из этих параметров следует возложить на алгоритм.

На первом этапе проверялись некоторые идеи, положенные затем в основу конструирования алгоритмов. Вопрос быстрейшего рассмотрения в плане выбора принципов работы алгоритмов отслеживания. Обеспечения быстрейшего за счет рациональной программной реализации специально не проводилось. Поэтому в дальнейшем, по крайней мере, некоторые из подпрограмм, написанных на ФОРТРАНе, целесообразно перевести на Ассемблер.

4. Структура алгоритмов и назначение подпрограмм. Алгоритм реализован на ФОРТРАНе. Для удобства конструирования различных модификаций алгоритмов используется модульный принцип: ряд типичных операций оформлен в виде самостоятельных блоков — подпрограмм, что позволяет легко наращивать сложность уже имеющихся программ, не внося существенных изменений, или строить алгоритмы совсем иной конфигурации.

По той роли, которую они выполняют в работе алгоритмов, подпрограммы можно разбить на:

вспомогательно-обслуживающие: RAM, NPRIN, GRAF, PRIN;

подготовительные: SMOG, ANFANG;

базисные первого уровня: LINE, LIN, GRAN;

базисные второго уровня: CENTR, CHAIN, KRUG, FAN.

На их основе создаются программы, из которых мы вкратце опишем две: BROAD и SWT.

Рассмотрим вначале назначение каждой из перечисленных подпрограмм.

Подпрограмма RAM очерчивает электронным лучом фрагмент кадра, подлежащий электронному сканированию. Подпрограмма NPRIN дает качественное представление об обрабатываемом фрагменте, выдавая его на АЦПУ в виде полутоновой картины, где символы подобраны так, что визуально воспринимаются восемь градаций плотности.

Подпрограмма GRAF выдает на АЦПУ звездочками фрагмент отслеженной траектории.

Подпрограмма PRIN в некотором смысле совмещает функции NPRIN и GRAF, но независимо от характера исходного изображения отображает его в негатив, чтобы на светлом поле линии были видны точки отслеженной траектории.

Подпрограмма SMOG строит гистограмму распределения изменений коэффициента пропускания по кадру, позволяет назначить оптимальный режим работы ФЭУ и выбрать уровень регистрации сигнала.

Подпрограмма ANFANG отыскивает в кадре изображение и вычисляет необходимые исходные данные для последующей работы основной программы.

Подпрограммы LINE и LIN выполняют большую часть работы в процессе отслеживания линий. Первая из них осуществляет регистрацию перехода с изображения на фон (или обратно) при движении луча по прямой, а вторая — при движении луча по дуге окружности.

Подпрограмма GRAN контролирует выход луча за границы кадра.

Подпрограмма CENTR при выходе на перекресток по грубому целеуказанию осуществляет уточнение положения центра перекрестка.

Подпрограмма KRUG служит для определения и регистрации различных направлений выхода с перекрестков.

Подпрограмма CHAIN осуществляет аппроксимацию скелета линии ломаной. Различные режимы работы подпрограммы позволяют ли-

бо ограничивать максимальный размер звена цепи, либо использовать естественное ограничение — пребывание ломаной в пределах отслеживаемого лабиринта.

Подпрограмма FAN более трудоемка, но позволяет точнее определить положение отдельных точек скелета линии и облегчает прохождение простых траекторий без обращения к подпрограмме KRUG.

Программа BROAD ориентирована на отслеживание простых, однопроходных траекторий.

Программа SWT служит для отслеживания линий общего вида. Наличие разветвлений линий приводит к существенному усложнению алгоритма по сравнению с программой BROAD: вводится «запоминание» перекрестков и направлений выходов из них, которые гасятся по мере отслеживания. Работа программы продолжается до тех пор, пока все направления всех перекрестков не будут исчерпаны.

5. Описание некоторых подпрограмм.

Подпрограмма SMOG предназначена для налаживания контакта оператора и вычислительной машины с автоматом «Зенит» и позволяет контролировать выбор оптимального режима работы ФЭУ. SMOG осуществляет электронное сканирование фрагмента изображения в узлах равномерной прямоугольной решетки в 41×41 точках, строит по полученным данным гистограмму распределения коэффициента пропускания, оценивает положения максимумов плотности сигнала и шума, вычисляет дисперсию шума и рекомендует оператору значение уровня регистрации сигнала в последующей работе алгоритмов. Используемый при отыскании максимумов плотности распределения коэффициентов пропускания для шума и сигнала метод идейно близок методу гистерезисного сглаживания [1]. После скользящего сглаживания гистограммы экстремумы для сигнала и шума фиксируются в процессе перемещения от границ гистограммы ($K=0$ и $K=127$) к противоположным границам ($K=127$ и $K=0$) в том случае, если последующие m точек гистограммы оказываются ниже. Число m может автоматически варьироваться от 15 до 10. Вариация осуществляется, если не выделится максимум, отвечающий сигналу. Если и после снижения m до 10 максимум распределения сигнала не обнаруживается, система извещает об этом оператора, делает вывод об отсутствии в кадре изображения и рекомендует выбирать уровень регистрации сигнала, основываясь только на дисперсии шума (отступив 5σ от значения коэффициента пропускания, отвечающего максимуму плотности шума, в сторону сигнала). При обнаружении на гистограмме максимумов сигнала и шума рекомендуется выбирать уровень регистрации сигнала E равным полусумме коэффициентов пропускания, отвечающих этим максимумам. Такой выбор величины E примерно соответствует максимуму коэффициента контрастности фотоматериала [9].

Дисперсия шума вычисляется так, как если бы распределение шума было симметричным, основываясь на той ветви гистограммы шума, которая направлена в противоположную сторону от положения максимума плотности сигнала. Разумеется, в действительности положение максимума распределения шума обычно не совпадает с центром линейного участка характеристики фотоматериала и измерительной системы или с центром ее симметрии, если даже характеристику можно считать симметричной. Тем самым получаем несколько заниженное значение дисперсии.

Качественную картину дает гистограмма, которая чутко реагирует на выбор режима ФЭУ смещением максимумов распределений шума и сигнала и сжатием динамического диапазона коэффициентов пропускания.

Подпрограмма KRUG служит для определения направления всех ветвей, выходящих из перекрестка. Для этого строится окружность

(рис. 3) радиуса R , равного последнему значению текущей ширины линии, измеренной перед обнаружением перекрестка. Координаты центра окружности (точки O) определяются с помощью подпрограммы CENTR. Просмотр точек окружности осуществляется «большим» шагом (0,3 рад) до тех пор, пока некоторая точка A не попадет на изображение (линию), после чего уже с малым шагом (0,06 рад) просматриваются точки окружности в окрестности точки A с целью определения координат граничных точек изображения (B и C) (подпрограмма LIN). Одновременно определяются и углы φ_n и φ_k , образуемые с осью OX радиусами OB и OC . При этом за граничную

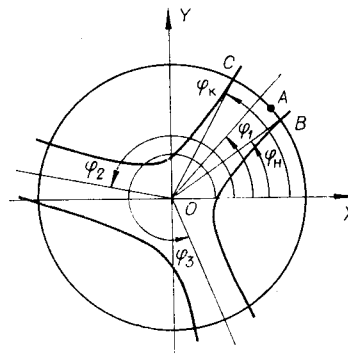


Рис. 3.

точку принимается та точка окружности, после которой заданное количество r следующих точек попадает на фон. Работа подпрограммы LIN в некотором смысле аналогична подпрограмме LINE, но просмотр точек осуществляется не по прямой линии, а по окружности радиуса R . Соответственно дискретность выбора точек определяется приращением угла φ (в радианах) и величиной радиуса R . За направление найденной ветви принимается угол $\varphi_1 = (\varphi_k + \varphi_n) / 2$. Все найденные направления φ_i , кроме направления прихода в перекресток, запоминаются в специальной матрице. Если радиус R окажется слишком мал, то отдельные ветви не зафиксируются. Для избежания этого при пересечении каждой ветви измеряется угол $\varphi_{li} = \varphi_k - \varphi_n$, и если окажется, что для некоторого направления $\varphi_{li} \geq 1$, то радиус окружности увеличивается в 1,5 раза и построение начинается сначала. Кроме того, если какой-либо угол φ_{li} окажется слишком мал ($\varphi_{li} \leq 0,1$), то считается, что окружность пересекла «помеху» и соответствующее направление φ_i не фиксируется. Из всех найденных направлений наивысший приоритет, т. е. возможность быть обработанным в первую очередь, получает то направление, которое наиболее близко к линейной экстраполяции направления входа в перекресток. Это обеспечивает, в частности, оптимальное отслеживание однопроходных линий.

Подпрограмма LINE относится к базисным подпрограммам первого уровня и осуществляет перемещение из заданной точки в заданном направлении с заданной дискретностью h на заданное число шагов r или до границы изображения, если последнее окажется ближе. Подпрограмма может регистрировать переход как с изображения на фон, так и обратно — с фона на изображение. Для регистрации этого перехода используются различные критерии, которые и определяют различные модификации подпрограммы. Для преодоления в процессе отслеживания разрывов в изображении и с учетом зашумленности кадра предусмотрен режим работы, в котором граница регистрируется в том случае, если за последней точкой изображения (фона) следуют r точек, принадлежащих фону (изображению). Движение до границы изображения может осуществляться либо всегда с дискретностью h , либо вначале с более грубым шагом — $5h$. Во втором случае после перехода за границу изображения происходит возврат в предыдущую точку, затем движение продолжается в прежнем направлении, но уже с более мелким шагом h для точной регистрации граничной точки. Критерий регистрации границы остается в обоих случаях таким, как описано выше.

Модификацией подпрограммы, обеспечивающей максимальное быстрое действие, является подпрограмма, использующая принцип дихо-

томии. Она рассчитана на работу с изображениями, имеющими большое отношение сигнал/шум. Если требуется осуществить перемещение на расстояние, не превышающее th , на первом же шаге происходит просмотр этой предполагаемой конечной точки следования. И если окажется, что она принадлежит изображению (или фону при перемещении в пределах фона), работа подпрограммы на этом завершается. В противном случае, если осуществился переход за границу изображения, величина шага уменьшается вдвое и происходит возврат на один шаг. Затем вновь шаг уменьшается вдвое и осуществляется перемещение в прежнем или обратном направлении в зависимости от положения границы изображения. Уменьшение длины шага проводится до достижения желаемой точности регистрации положения. Преимущества этого алгоритма растут с увеличением отношения th к требуемой точности.

Наконец, можно совместить регистрацию граничной точки изображения с элементарной статистической обработкой. Для этого используется скользящее сглаживание, например, по 3 или 5 точкам и регистрируется граница изображения при пересечении заданного уровня сглаженным значением коэффициента пропуска, соответствующего середине скользящего интервала. В том случае, когда оптическая плотность по кадру меняется в значительных пределах (скажем, на порядок), целесообразно работать с вариантом подпрограммы, использующим в качестве критерия фиксации границы изображения коэффициент контрастности [10]. Если попутно осуществлять скользящее сглаживание коэффициента пропуска, используя линейную модель $a+bx$ с регистрацией ее параметров в центре скользящего интервала, коэффициент контрастности будет равен b/a при сглаживании по трем точкам и $2b/a$ при сглаживании по пяти точкам.

Различие в критериях фиксирования границы является существенным при выборе соответствующей модификации процедуры LINE для организации движения в пределах линии соответственно в тангенциальном или нормальном направлениях. При движении в нормальном направлении использование статистической обработки предпочтительнее, в то время как при движении в тангенциальном направлении большее значение приобретает условие преодоления разрывов линии.

Подпрограмма FAN используется одним из вариантов подпрограммы CHAIN и позволяет более точно оценивать положение точек

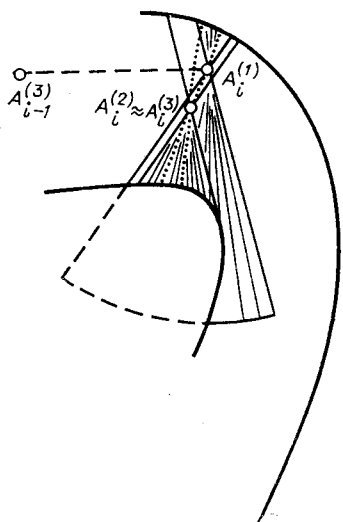


Рис. 4.

скелета линейчатого изображения. FAN проводит нормаль к предыдущему звену через заданную, линейно экстраполированную по последним двум точкам цепи точку и затем симметрично, справа и слева от нормали, строит веер лучей, направленных к противоположным границам изображения (рис. 4). Лучи веера идут с дискретностью $\Delta\varphi$ в двух секторах $-\alpha \pm \varphi$ и $\alpha + 180^\circ \pm \varphi$, где α — угол нормали. Вычисляются длины отрезков, образуемых пересечением лучей с противоположными границами изображения, и выбирается наименьший из них. Середина этого отрезка служит выходным параметром подпрограммы FAN и является приближением точки скелета линии. Если необходимо повысить точность локализации точек скелета, осуществляется несколько итераций. На каждой последующей итерации стартовой точкой подпрограммы FAN является точка, полученная на предыдущем шаге. При этом нормаль проводится к отрезку,

соединяющему итерированную точку скелета с предшествующей ей, отслеженной ранее. Прекращаются итерации вхождением вектора поправок точки скелета в заданную ε -область. Стартовая точка подпрограммы FAN может оказаться на границе изображения, тогда веер лучей строится только в одном направлении.

Важной, по нашему мнению, особенностью подпрограммы FAN является то, что лучи пересекают границу по возможности в нормальном, а не тангенциальном направлении, ослабляя этим влияние ее изрезанности («бахромы»).

Подпрограмма CHAIN реализует самобалансирующийся алгоритм движения вдоль отслеживаемой линии. CHAIN фиксирует координаты узловых точек цепи, полученной в результате отслеживания, и соответствующие им координаты граничных точек линии. Основной подпрограммой, которую использует CHAIN, является подпрограмма LINE. В одной из модификаций, предназначенных специально для регистрации точек скелета, используется также подпрограмма FAN. Всего разработано четыре модификации подпрограммы.

Подпрограмма CHAINB. Из последней точки (точка $A_{i-1}^{(2)}$, рис. 5) отслеженного звена цепи с помощью подпрограммы LINE осуществляется перемещение в направлении, продолжающем последнее звено на некоторое заданное расстояние l или до пересечения с границей линии, если последняя встретится раньше. В конечной точке этого пути (точка $A_i^{(1)}$) строится нормаль к экстраполированному звену цепи. Длина отрезка, образуемая пересечением этой нормали с границами линии, условно называется шириной линии в данной точке (в точке $A_i^{(1)}$). Далее находится середина этого отрезка нормали, которая и принимается в качестве новой отслеженной точки (точка $A_i^{(2)}$). Тем самым новое отслеженное звено цепи будет $A_{i-1}^{(2)}A_i^{(2)}$. Дальнейшее движение осуществляется из точки $A_i^{(2)}$ в направлении $A_{i-1}^{(2)}A_i^{(2)}$, и вся процедура повторяется. Преимущество этой подпрограммы — устойчивость ее работы и высокое быстродействие.

Подпрограмма CHAINF (см. рис. 5) использует вместо построения нормали подпрограмму FAN. После завершения итерационного процесса, связанного с повторным вызовом подпрограммы FAN, регистрируется оценка координат точки скелета и связанное с нею расстояние до границ изображения.

Подпрограмма CHAINS (рис. 6). Вводится ограничение на размер звена цепи, т. е. проводятся итерации до тех пор, пока не выполнится это требование. Начало работы алгоритма такое же, как и в первой модификации. Но если оказывается, что длина звена $A_{i-1}^{(h)}A_i^{(2)}$ превышает в q раз ($q > 1$) вводимый размер l , осуществляется новая итерация. Для этого на звене выбирается точка $B_i^{(2)}$, отстоящая от точки $A_i^{(h)}$ на расстоянии l , и строится из нее нормаль к звену $A_{i-1}^{(h)}A_i^{(2)}$. Середина отрезка этой нормали, отсекаемого границами изображения, принимается за новую оценку положения последней точки звена цепи. Если и она оказывается удаленной от точки $A_{i-1}^{(h)}$ более чем на ql , итерации продолжают. Число итераций определяется степенью близости q к единице.

Подпрограмма CHAIND (рис. 7). В этой модификации ограничения на размер звена цепи не вводятся — последнее лимитируется самим изображением и вводимым коэффициентом использования укладываемого в пределах лабиринта отрезка прямой. Построение цепи начи-

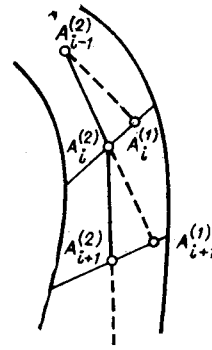


Рис. 5.

нается так же, как и в первой модификации, только точка $A_i^{(1)}$, в которой строится нормаль к направлению перемещения, удалена от последней отслезенной точки цепи $A_{i-1}^{(2)}$ на qf , где f — расстояние от точки $A_{i-1}^{(2)}$ до границы изображения, а q — коэффициент использования этого расстояния ($q < 1$). Середина отрезка этой нормали, отсекаемого границами изображения, — точка $A_i^{(2)}$ — принимается за отслезиваемую точку. Далее движение продолжается из точки $A_i^{(2)}$ в направлении $A_{i-1}^{(2)}A_i^{(2)}$.

Программа SWT предназначена для автоматического отслезивания сложных линий, которые, в частности, могут иметь перекрестки (пересечения и ветвления) различной конфигурации и с различным количеством выходящих из них ветвей. При реализации алгоритма максимальное число ветвей было ограничено семью, хотя такое ограничение не является принципиальным. Но само наличие ветвлений отслезиваемых линий требует включения в алгоритм процедур анализа перекрестка. С этой целью в алгоритме предусматривается «запоминание» каждого перекрестка и направлений всех выходящих из него ветвей. При этом «запоминание» перекрестка подразумевает не только фиксирование некоторой принадлежащей перекрестку точки, принимаемой за центр перекрестка, но и некоторой окрестности этой точки, которую будем для простоты называть окрестностью перекрестка. Выбор вводимого размера этой окрестности должен происходить с учетом следующих требований. Окрестность каждого перекрестка не должна пересекаться с окрестностями какого-либо другого перекрестка. В то же время она должна быть достаточно велика, чтобы исключить возможность вторичной фиксации перекрестка; для этого окрестность перекрестка должна охватывать начала всех выходящих из него ветвей. Работа алгоритма начинается с поиска двух точек изображения, принадлежащих цепи (подпрограмма ANFANG). Для этого производится сканирование кадра с шагом, равным априорной ширине линии, сначала параллельно оси X , а если изображение не будет найдено, то параллельно оси Y . При нахождении начала линии определяется ее сечение в направлении сканирования. За точки цепи берутся средние точки двух соседних сечений линий, если они удовлетворяют условию связности, т. е. соединяющая их прямая принадлежит тому же изображению. Если весь кадр окажется просканированным, а линия найдена не будет, априорная ширина линии может быть уменьшена и повторен

поиск начала. После нахождения начальных точек цепи начинается движение по линии с помощью подпрограммы LINE. Направление движения на каждом шаге определяется путем линейной экстраполяции по двум последним точкам цепи. На каждом шаге строится сечение линии в направлении, перпендикулярном к направлению шага, измеряется текущая ширина H_T и находится геометрический

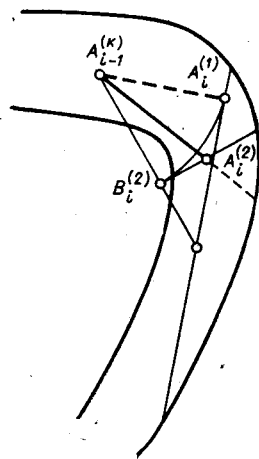


Рис. 6.

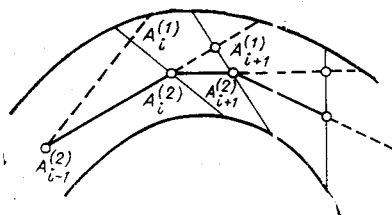


Рис. 7.

центр сечения (подпрограмма GCL). Координаты этого центра принимаются за координаты очередной точки цепи, после чего снова происходит выбор нового направления движения.

После каждого измерения текущей ширины линии H_t происходит ее сравнение с предыдущей — H_0 . Если в процессе отслеживания цепи в некоторой точке произойдет резкое увеличение или уменьшение толщины линии, то это означает обнаружение перекрестка, крутого поворота линии или просто резкое изменение толщины линии. В этом случае проводится анализ окрестности этой точки для проверки наличия перекрестка.

Вначале находится уточненное значение центра предполагаемого перекрестка — точка O с координатами X_0, Y_0 (подпрограмма CENTR). Затем проверяется, не попадает ли точка O в окрестность какого-либо из уже обнаруженных перекрестков. Если такой перекресток имеется, то движение продолжается в направлении одной из непройденных ветвей этого перекрестка. Если окажется, что все ветви перекрестка уже отслежены, то происходит проверка всех перекрестков для определения непройденных направлений, и если таких не окажется, то отслеживание считается оконченным. Если же точка O не принадлежит ни одному из ранее запомненных перекрестков, то вызывается подпрограмма KRUG. В результате работы подпрограммы KRUG может оказаться, что окрестность точки O имеет только одну ветвь, выходящую из перекрестка (подпрограмма KRUG не фиксирует направление прихода в точку O). Такая окрестность является местом поворота линии или резкого изменения ее толщины и в качестве перекрестка не запоминается, а движение продолжается в направлении выходящей ветви. Однако такие точки запоминаются как характерные (информативные), используемые при дальнейшем анализе отслеженных изображений. Если будет обнаружено несколько ветвей, выходящих из перекрестка, отслеживание продолжается по ветви, имеющей наибольший приоритет. Предусмотрены два случая окончания отслеживания линии:

- 1) отслежены все ветви во всех перекрестках;
- 2) расстояние между последней и предпоследней точками цепи становится меньше некоторого заданного предела. В этом случае проводится круг радиуса H_t с центром в последней точке для определения возможного выхода из «тупика». Этот случай соответствует концу линии или ее разрыву, превышающему допустимый разрыв, определяемый параметром r .

Программа BROUD построена на основе подпрограммы CHAIN и предназначена для быстрого отслеживания однопроходных линий (без анализа разветвлений). Подготовка алгоритма к работе организована аналогично алгоритму SWT: определяется пороговое значение E коэффициента пропуска (SMOG) и находятся две начальные точки, принадлежащие изображению (ANFANG). После этого начинается построение цепи отслеживаемой линии с использованием метода линейной экстраполяции по двум последним точкам цепи (CHAIN). В местах самопересечения линий возможен вызов подпрограммы KRUG для определения наиболее логичного направления дальнейшего движения путем экстраполяции уже отслеженного участка линии. Подпрограмма KRUG вызывается также в том случае, если в процессе отслеживания длина звена цепи становится меньше $4h$, что может быть либо при крутом повороте линии, либо при обрыве, либо при окончании линии. В первом случае подпрограмма KRUG определит направление дальнейшего движения, во втором случае новое направление найдено не будет и отслеживание прекратится.

6. Экспериментальная проверка алгоритмов. Подпрограмма SMOG обычно предшествовала работе других подпрограмм. Она оказалась достаточно простым инструментом для выбора режима работы ФЭУ, ведущего к максимальному отношению сигнал/шум. Гистограммы, по-

лучаемые с ее помощью, и вычисление в ней дисперсии шума подтвердили, в частности, вывод Кульбеды [11], адресованный к обработке снимков пузырьковых камер, о том, что использование негативов ведет к уменьшению дисперсии шума, так как при некотором усреднении сигнала от ФЭУ основной вклад в дисперсию шума вносит фотопленка, шум которой минимален при темном фоне. Типичный пример гистограммы для позитива, полученной с помощью подпрограммы SMOG, приведен на рис. 8. Величины среднеквадратичных отклонений для позитивов и негативов могут отличаться почти на порядок. Правда, при используемом в данной работе способе обработки (переход от полутоновых к двухградационным изображениям и почти полное отсутствие статистических методов сглаживания) играет роль не дисперсия шума, а вероятность попадания фона в область сигнала (при уровнях регистрации, обеспечивающих одни и те же размеры сигнала и для позитива, и для негатива). И если эта вероятность сохраняет свое значение, увеличение дисперсии шума не отражается на качестве работы алгоритмов. Однако при ином уровне регистрации эта инвариантность уже может нарушаться так же, как и при привлечении, скажем, скользящего сглаживания при регистрации границы изображения. И здесь, если имеется такая возможность, предпочтень следует негатив.

Исследовались различные режимы работы подпрограмм CHAIN:
CHAINB, CHAINF, CHAINS, CHAIND.

Экспериментальная проверка показала, что наибольшей устойчивостью обладает четвертый вариант подпрограммы — CHAIND. Целесообразно использовать ее для адаптивной аппроксимации линейчатого изображения цепью, все звенья которой лежат в пределах лабиринта. Из всех вариантов CHAIN она обеспечит наиболее сжатое представление сигнала.

Подпрограмма CHAINF позволяет более точно оценивать положение точки скелета изображения. Но так как при построении каждого нового звена цепи сканирование осуществляется в некотором секторе лабиринта, подпрограмма, естественно, оказалась более подверженной сбоям. Причиной сбоев являлись фоновые неоднородности, расположенные в русле лабиринта. Если размеры этих неоднородностей в направлении их сканирования превышали допустимую величину разрыва, они либо пересекали дальнейшее прослеживание линии, если критерием ее конца избиралось уменьшение ширины за некоторое пороговое значение, либо приводили к значительным погрешностям в регистрации скелета. При использовании процедуры CHAINF с небольшим размером звена

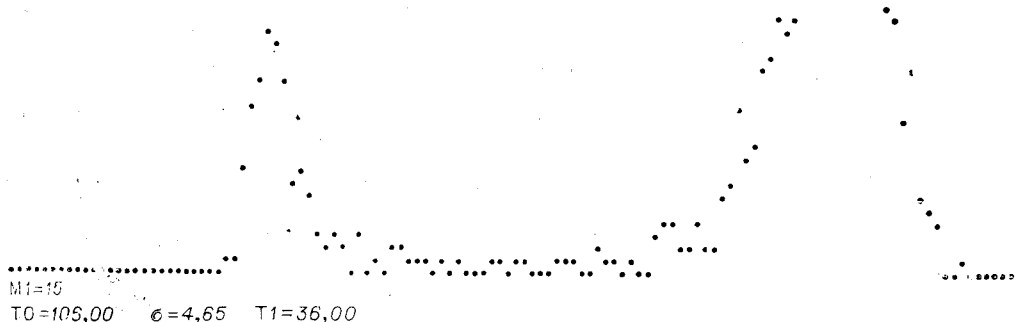


Рис. 8.

цепи вероятность встретить такое препятствие (если оно есть на самом деле) будет близка к 1, в то время как в иных модификациях подпрограммы CHAIN эта вероятность существенно ниже. Таким образом, использовать подпрограмму CHAINF без привлечения подпрограммы KRUG целесообразно при обработке изображений с большим отношением сигнал/шум, не содержащих фоновых вкраплений в русле лабиринта. В этом случае она обеспечит отслеживание простых, однопроходных изображений. При нарушении этого требования придется прибегать к помощи подпрограммы KRUG для нейтрализации действия фоновых неоднородностей.

Коснемся теперь вопроса отслеживания разрывных изображений. Подпрограмма CHAIN построена таким образом, что для сканирования в тангенциальном (вдоль отслеживаемой линии) и нормальном направлениях могут использоваться различные процедуры LINE (например, с различным уровнем или критерием регистрации границы изображения). Тем самым в тангенциальном и нормальном направлениях вокруг отслеживаемой линии порождается зона нечувствительности, или, быть может, правильнее сказать,— зона поглощения. Если в этой зоне окажется фрагмент соседнего изображения или просто другой участок того же отслеживаемого фрагмента, они будут слиты воедино. Кроме того, отследить разрывное изображение подпрограмма CHAIN может в том случае, когда в процессе линейной экстраполяции звено цепи, преодолев разрыв, попадает на то же изображение, т. е. когда зона разрыва не совпадает с областью, где возрастает выше некоторого предела кривизна или имеет место излом изображения. Это требование и накладывает ограничение на допустимую величину разрыва. Очевидно, она определяется степенью гладкости отслеживаемой линии. Чем меньше кривизна, тем большую величину разрыва можно допустить и преодолеть без существенного расширения зоны поглощения вокруг отслеживаемого изображения. Этим мы несколько уточнили смысл введенного в начале работы ограничения на величину допустимых разрывов линии.

Упоминания заслуживает и тот факт, что вызов подпрограммы KRUG, осуществляемый при резком изменении текущей ширины линии, обычно имеет место не только на перекрестках, но и на участках линий повышенной кривизны или на участках, содержащих изломы. Тем самым алгоритм выделяет информативные точки изображения [1, 2].

На рис. 9 приведено изображение однопроходной линии, отслеженной с помощью программы BROAD, а на рис. 10 — линейчатого изображения с перекрестком общего вида, обработанного с помощью программы SWT.

7. Заключение. Приведенные выше алгоритмы следует рассматривать как первый этап в процедуре обработки линейчатых изображений. Причем в плане продолжения работ этого первого уровня целесообразно перейти на обработку внутри лабиринта (с выходом за его пределы не далее незначительной зоны поглощения) и областей в окрестности характерных точек — перекрестков, крутых поворотов и изломов.

Этап отслеживания изображений базировался в основном на линейной экстраполяции и линейном сканировании. Привлекательность такого подхода не только в элементарности сопутствующих ему вычислений, но и в неиспользованных пока резервах системы «Зенит» в направлении повышения быстродействия сканирования за счет возможного перехода в автономный режим. В этом режиме сканирование отрезка, на котором коэффициент пропуска изображения больше или меньше выбранного порога, можно было бы осуществлять со скоростью 10^5 точек в секунду. Существенно упростилась бы также задача отслеживания линейчатых изображений введением программно-управляемого диаметра сканирующего луча. (Использование этого принципа см. в [8].)

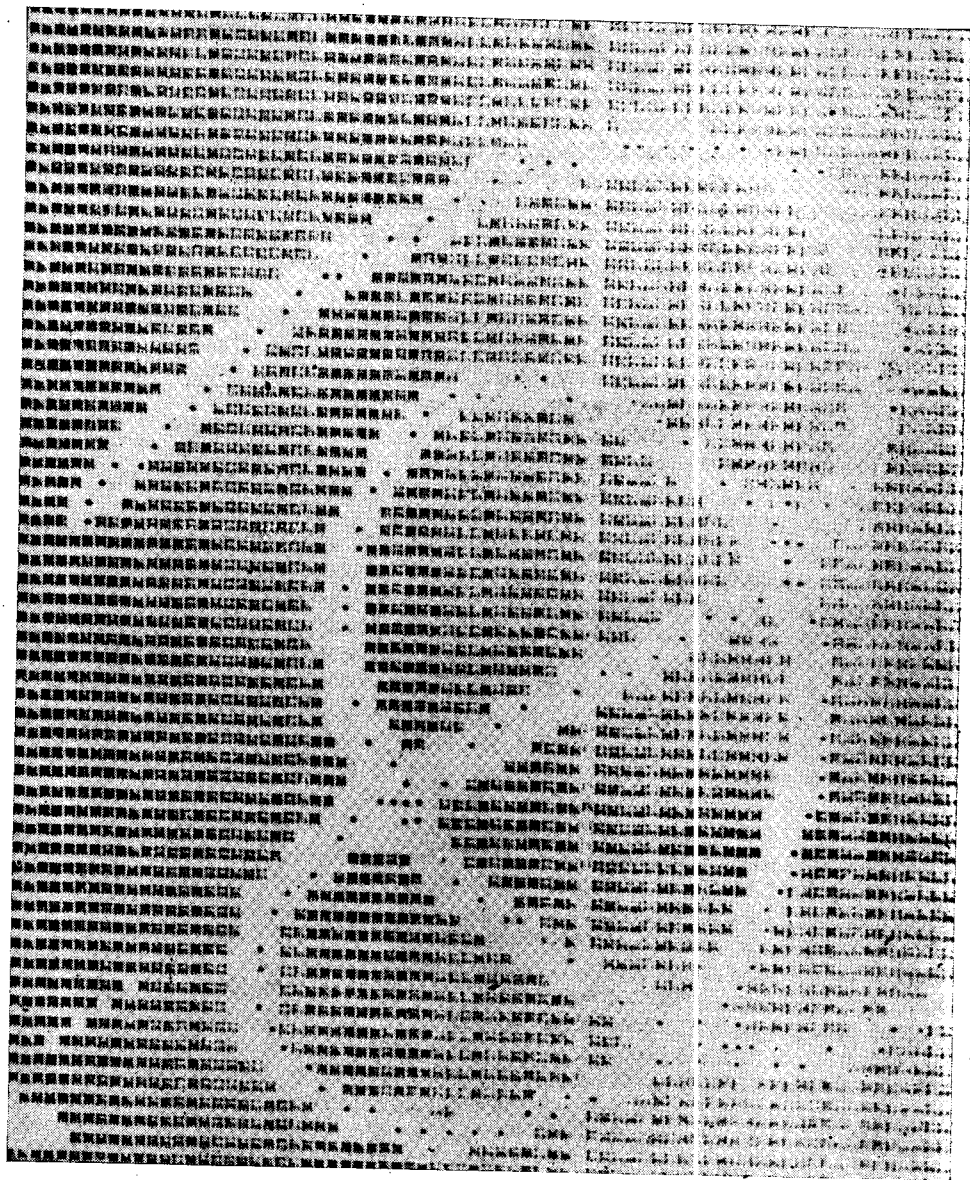


Рис. 9.

Результатом работы рассмотренных алгоритмов являются массивы внутренних и граничных точек (или функции гашения) изображения, дискретностью следования которых можно варьировать, расплываясь временем сканирования связанного фрагмента. И при последующей обработке изображения, где предполагается более широко использовать статистические методы, разумеется, совершенно не обязательно использовать линейную интерполяцию, как об этом говорилось в п. 3, для целей репродуцирования — математическая модель будет диктоваться природой исследуемого явления. Это могут оказаться, в частности, сплайны, опирающиеся на зарегистрированные в ходе отслеживания характерные точки. Интересно в этом плане и описание изображения скелетной парой, в которой выделена лишь осевая ветвь скелета. Такое упрощение сигнала, сопровождающееся отбрасыванием второстепен-

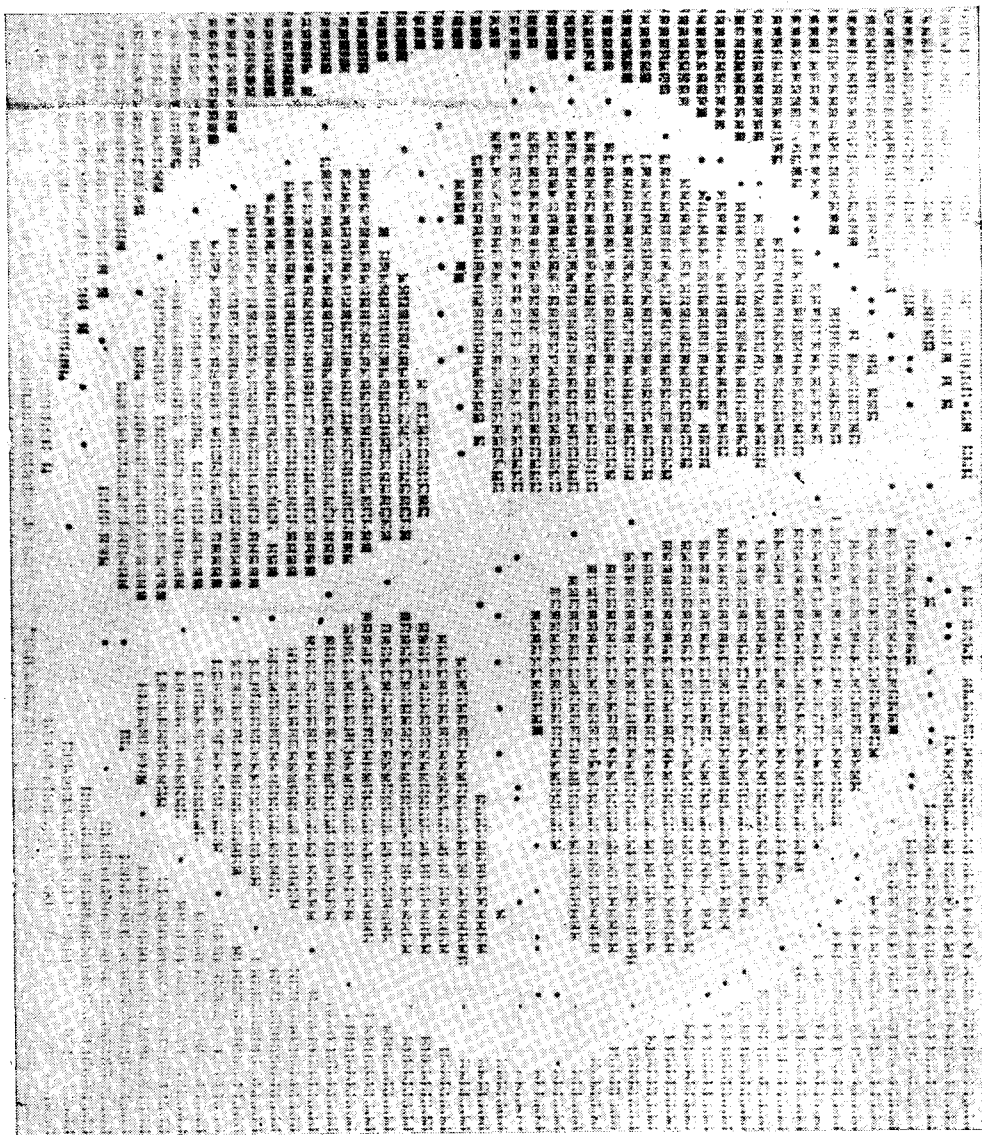


Рис. 10

ных деталей и попутно ослабляющее действие случайных шумов, будет сохранять «индивидуальность» любого изображения, не навязывая ему нуждой формы представления.

Мы имели неоднократную возможность убедиться в нечеткости и размытости используемых терминов и критериев, однако привлечь, несомненно, уместные здесь понятия и аппарат, введенный Лютфи Заде, представляется нам пока преждевременным, учитывая сравнительную простоту стоящих на первом этапе задач.

Естественно, принятая модель сигнала не исчерпает всех случаев, с которыми придется встретиться на практике, даже при обработке линейчатых изображений. Следовательно, рассчитывать на создание полностью автоматической системы отслеживания произвольных линий нереально. Помощь оператора вычислительной системы будет наиболее эффективна при наличии дисплея со световым пером и математическим обеспечением, позволяющим вести диалог с системой в рамках некото-

рого словаря, запас которого можно постепенно пополнять. Переход к такой полуавтоматической системе, обращающейся в затруднительных случаях к помощи оператора, облегчил бы решение таких вопросов, как выбор всех связанных фрагментов изображения, установление приоритета в их отслеживании, обработка сложных перекрестков, отбраковка помех, близких по форме к сигналу, выбор фрагментов, требующих прецизионной обработки и т. п.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. М., «Мир», 1976.
2. Левин М. Д. Методы выделения признаков.— «Обзор ТИИЭР», 1969, т. 57, № 8, с. 51—69.
3. Васьков С. Т., Нестерихин Ю. Е., Пушной Б. М. Об универсальном фотограмметрическом автомате.— В кн.: Средства ввода в ЭВМ и отображения графической информации. Новосибирск, изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1974.
4. 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.
5. Бурый Л. В., Кузнецов С. А., Луговой Л. Г., Нестеров А. А., Пушной Б. М. Электромеханическая система позиционирования фотограмметрического автомата «Зенит».— «Автометрия», 1977, № 3, с. 12—19.
6. Мамонтов Г. М., Поташников А. К., Ситников Г. Ф. Сканирующее устройство универсального фотограмметрического автомата «Зенит».— «Автометрия», 1977, № 3, с. 39—45.
7. Поляков В. Г., Переверзев-Орлов В. С. Электронные системы следящей развертки. М., «Энергия», 1968.
8. Петренко А. И., Абакумов В. Г., Будняк А. А., Дядюра В. А., Капшук О. А., Фесечко В. А. Обработка графической информации на ЭВМ. Киев, «Техника», 1974.
9. Гришин М. П., Курбанов Ш. М., Маркелов В. П. Автоматический ввод и обработка фотографических изображений на ЭВМ. М., «Энергия», 1976.
10. Козлов В. В. Использование особенностей фотометрических характеристик оптической камеры «Мирабель» при нормировании трековых сигналов.— Труды Радиотехнического института АН СССР, № 10. М., 1972.
11. Кульбеда В. Е. Сравнительный анализ влияния шумов фото пленки и ФЭУ на отношение сигнал/шум при сканировании снимков пузырьковых камер.— Труды Радиотехнического института АН СССР, № 10. М., 1972.

Поступила в редакцию 29 декабря 1976 г.

УДК 621.391 : 681.3.01

В. П. КОСЫХ, Г. П. ЧЕЙДО

(Новосибирск)

АВТОМАТИЗАЦИЯ АСТРО- И ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Введение. За долгую историю развития астрономии созданы удивительные по совершенству и точности приборы для измерения положений в пространстве естественных и искусственных небесных тел. Единственное неудобство этих приборов заключается в отсутствии прямого отсчета координат. Результаты наблюдений, как правило, регистрируются на фотопластинках, которые в астрономии, по-видимому, еще долгое время будут служить незаменимыми накопителями. Определение положения тел в пространстве осуществляется путем измерения координат их изображений на фотопластинке и последующих вычислений. Имеется ряд устройств для измерения координат точек на фото-