

А. П. ГУК

**ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА
СНИМКОВ**

НОВОСИБИРСК

1987

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
Р С Ф С Р
НОВОСИБИРСКИЙ ОРДЕНА "ЗНАК ПОЧЕТА"
ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ГЕОДЕЗИИ, АЭРОФОТОСЪЕМКИ И КАРТОГРАФИИ**

А.П. ГУК

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СНИМКОВ

**Учебное пособие
для студентов специальности 1303**

**Новосибирск
1986**

УДК 528.73

62Г

А.П.Гук. Цифровая обработка снимков. Учебное пособие. - Новосибирск: НИИГАиК, 1986. - 8Г с.

Учебное пособие написано доцентом, к.т.н. кафедры фотограмметрии Гук А.П. и утверждено на заседании учебно-методической комиссии аэрофотогеодезического факультета

" 22 " октября 1986 г.

В учебном пособии изложены основные идеи цифровой обработки снимков. Подчеркнуты особенности использования цифровых методов для решения фотограмметрических задач. Особое внимание уделено устройствам ввода-вывода изображения, как основному звену, обеспечивающему метрические свойства процесса цифровой обработки снимков.

Библ.14, табл.3, ил. 3Г .

Рецензенты: лаборатория математического обеспечения обработки изображений ВЦ СО АН СССР

МАЛИНИН В.В. - доцент, к.т.н.

НИИГАиК

Печатается по постановлению редакционно-издательского совета НИИГАиК

© Новосибирский ордена "Знак Почета" институт инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии, 1986

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. СТРУКТУРА ЦЕНТРОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ	
1.1. Технические средства систем цифровой обработки изображений	7
1.2. Интерактивные дисплейные системы	12
1.2.1. Дисплейный терминал для анализа изображений "ОМЕГА"	14
1.2.2. Самостоятельный видеоинформационный терминал (СВИТ)	15
1.2.3. Цифровая система обработки изображений "ROBOTRON"	16
1.2.4. Интерактивная система цифровой обработки изображений DIAL	18
1.3. Подсистема хранения информации	18
1.4. Программное обеспечение систем обработки изображений	20
1.5. Применение цифровых методов обработки снимков при создании карт	23
2. УСТРОЙСТВА ВВОДА-ВЫВОДА ИЗОБРАЖЕНИЯ	
2.1. Принципы получения цифрового изображения	26
2.2. Математическая модель работы устройств ввода-вывода изображения	29
2.2.1. Получение цифрового изображения. Формализация работы устройств ввода	29
2.2.2. Визуализация изображения. Вывод изображения из ЭВМ	35
2.3. Устройство реальных систем ввода-вывода изображения	37
2.3.1. Классификация систем	37
2.3.2. Приборы, использующие ЭЛТ	38
2.3.3. Устройства электронно-оптического типа с механическим сканированием	39
2.3.4. Устройства, использующие многоэлементные приемники излучения	43

3. ДЕШИФРИРОВАНИЕ СНИМКОВ В СИСТЕМАХ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ	
3.1. Общие сведения	44
3.2. Дешифровочные признаки	45
3.3. Статистический подход. Байесовский классификатор	50
3.4. Обучение классификатора	54
3.4.1. Параметрический метод	54
3.4.2. Непараметрический метод	56
3.5. Кластерный анализ	57
4. УСТРАНЕНИЕ ИСКАЖЕНИЙ ИЗОБРАЖЕНИЯ ЦИФРОВЫМИ МЕТОДАМИ	
4.1. Модели ошибок изображения	58
4.2. Принципы цифровой коррекции	63
4.2.1. Устранение нелинейности функции тонопере- дачи	63
4.2.2. Улучшение резкостных свойств изображения	63
4.2.3. Геометрическая коррекция	68
5. ЯРКОСТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ	
5.1. Изменение контраста	71
5.2. Устранение шумов	73
5.3. Подчеркивание границ	74
5.4. Раскрашивание изображений и преобразование цвета	75
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	76
ЛИТЕРАТУРА	78
ПРИЛОЖЕНИЕ	79

ВВЕДЕНИЕ

Цифровая обработка изображений – новая самостоятельная область знания. Методы ее широко используются при обработке материалов съемок поверхности Земли в интересах геологии, сельского хозяйства, картографии, лесного хозяйства, метеорологии и т.д., а также в медицине, робототехнике, в промышленности – для контроля за технологическими процессами.

Перспективы развития фотограмметрии связаны с применением и развитием цифровых методов обработки снимков. Создание цифровых фотограмметрических систем позволит автоматизировать все основные процессы составления карт по снимкам, в том числе стереосъемки и дешифрирование снимков. Однако на пути создания таких систем существует множество трудностей, одна из которых непонимание перспектив использования цифровых методов в аэрофотогеодезическом производстве.

Сейчас для всех совершенно ясно, что необходимо использовать цифровые методы для обработки материалов космических съемок, в частности материалов сканерных и многозональных съемок поступающих по прямому каналу на станции наземной обработки. Это вызвано двумя причинами:

во-первых, высокая скорость и большой объем поступающей информации не позволяют достичь требуемой оперативности обычными средствами;

во-вторых, используя традиционные методики дешифрирования нельзя эффективно обработать многозональные снимки (современные системы позволяют получить одновременно от 2 до 24 изображений на один и тот же участок местности); здесь новое качество получается на основе использования нового дешифровочного признака – вектора плотностей изображения в различных зонах спектра, а оценить этот признак можно только применяя цифровые методы обработки.

Только цифровые фотограмметрические системы обеспечивают требуемую пропускную способность при обработке космических снимков, геометрическую и фотометрическую точность и позволяют реализовать количественный подход при анализе снимков, что в свою очередь обеспечивает получение новой информации о состоянии об-

ектов, изображенных на снимках. Этот вариант применения цифровых методов для обработки снимков успешно развивается. Создаются специальные центры цифровой обработки снимков и разрабатываются методики их использования в целях геологии, сельском хозяйстве, лесном хозяйстве и т.д. Однако в аэрогеодезическом производстве цифровые методы не применяются и нет четкой программы разработки технологии их использования для обработки снимков среднего и крупного масштабов при создании топографических карт. Объективной причиной является высокая стоимость устройств цифровой обработки снимков и ряд теоретических и практических проблем в цифровой обработке крупномасштабных снимков. Однако, стоимость вычислительных средств постоянно снижается и следует выполнить специальные исследования для разработки работоспособной технологии на основе цифровых методов. Только на основе этих методов возможна полная автоматизация процесса создания карт.

XXVII съезд КПСС поставил задачу разработки перспективных технологий, ориентированных на будущее. Такой технологией для аэрофотогеодезического производства и является технология, основанная на использовании цифровых фотограмметрических систем, причем она в корне отличается от ныне существующей и аэрофотогеодезическое производство необходимо уже сейчас готовить к ее внедрению. Все это требует скорейшей и углубленной подготовки инженера-аэрофотогеодезиста в области цифровой обработки изображений.

Данное учебное пособие - элементарное введение в круг идей цифровой обработки снимков. Основные вопросы рассматриваются с фотограмметрической точки зрения, подчеркнуты метрические проблемы обработки.

В пособии по возможности сохранены обозначения и терминология, используемая в монографии: У.Прэтт "Цифровая обработка изображений" М., Мир, 1982, т. I, 2. В этой книге наиболее полно отражены основные аспекты цифровой обработки снимков, однако, она сложна для первого знакомства с методами и рекомендуется в качестве основной для детального изучения вопроса.

В первой главе настоящего пособия рассмотрена структура центров цифровой обработки аэрокосмических снимков.

Вторая глава полностью посвящена описанию работы устройств ввода-вывода изображения, которые являются особо важной частью

систем цифровой обработки снимков.

В третьей главе даны основные принципы автоматизированного дешифрирования снимков. Рассмотрены идеи Байесовского классификатора и кластерного анализа.

Четвертая глава посвящена вопросам устранения геометрических, фотометрических и резкостных искажений снимка цифровыми методами.

В пятой главе показаны возможности преобразования изображения с помощью цифровых систем.

В заключении рассмотрены проблемы использования цифровых методов в фотограмметрии, перспективы цифровой фотограмметрии.

I. СТРУКТУРА ЦЕНТРОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

I.1. Технические средства систем цифровой обработки изображений

В настоящее время в Советском Союзе создано несколько центров цифровой обработки снимков, решающих как специализированные отраслевые задачи (например, геологии, сельского хозяйства, лесного хозяйства), так и ориентированные на широкий круг задач. В зависимости от конкретных задач структура центров изменяется, однако все они имеют устройства общего назначения.

Обработка изображений предъявляет повышенные требования к техническим средствам, что объясняется сверх большим количеством поступающих и обрабатываемых данных. Так, один снимок формата 18×18 содержит от $8 \cdot 10^5$ до $3,5 \cdot 10^8$ элементов изображения. Учитывая, что на кодирование одного элемента используется 8 бит (1 байт) получим, что снимок содержит $0,8 + 3,5 \cdot 10^2$ Мбайт информации.

Поэтому все каналы цифровых систем должны иметь очень высокую пропускную способность. Пропускная способность современных систем обработки изображений в зависимости от вида обработки колеблется в пределах $2 + 15$ Кбайт/с.

Для реализации цифровой обработки создаются специальные устройства и вычислительные средства, рассчитанные на быструю обработку сверхбольших массивов информации.

Рассмотрим основные технические средства, реализующие процесс цифровой обработки снимков.

1. Устройства ввода информации в ЭВМ.

Эти устройства обеспечивают поступление в ЭВМ всей необходимой информации и представление ее в определенном формате. Сюда относятся:

- устройства ввода изображения в ЭВМ (преобразования изображения в цифровую форму);
- устройства ввода графической информации в ЭВМ;
- устройства ввода цифровой и текстовой информации;

2. Устройства отображения информации:

- устройства преобразования цифрового изображения в фотографическое (устройства вывода изображения);
- устройства визуализации изображения на экране дисплея;
- устройства вывода изображения на проекционный экран;
- устройства графического отображения информации;
- устройства вывода текстовой информации.

3. Интерактивная дисплейная система - для отображения обрабатываемого изображения на цветном растровом дисплее и обеспечивающая диалог пользователя с системой в процессе обработки.

4. Управляющая ЭВМ - обеспечивающая взаимодействие всех устройств комплекса обработки изображений и контролирующая прохождение потоков данных через систему.

5. Базовый вычислительный комплекс, включающий высокопроизводительные универсальные ЭВМ и спецпроцессоры. Спецпроцессоры используются для выполнения высокоскоростной обработки однородных данных по типовым алгоритмам.

6. Система хранения данных реализуется обычно в виде памяти на магнитных дисках и магнитных лентах.

Используя различные виды физических устройств формируют центры цифровой обработки для решения конкретной задачи. На рис.1.1 представлены технические средства, используемые в Центре обработки Геоинформации ВЦ СО АН СССР.

Кроме базовых устройств обработки изображения картографическая цифровая система должна иметь дополнительные технические средства.

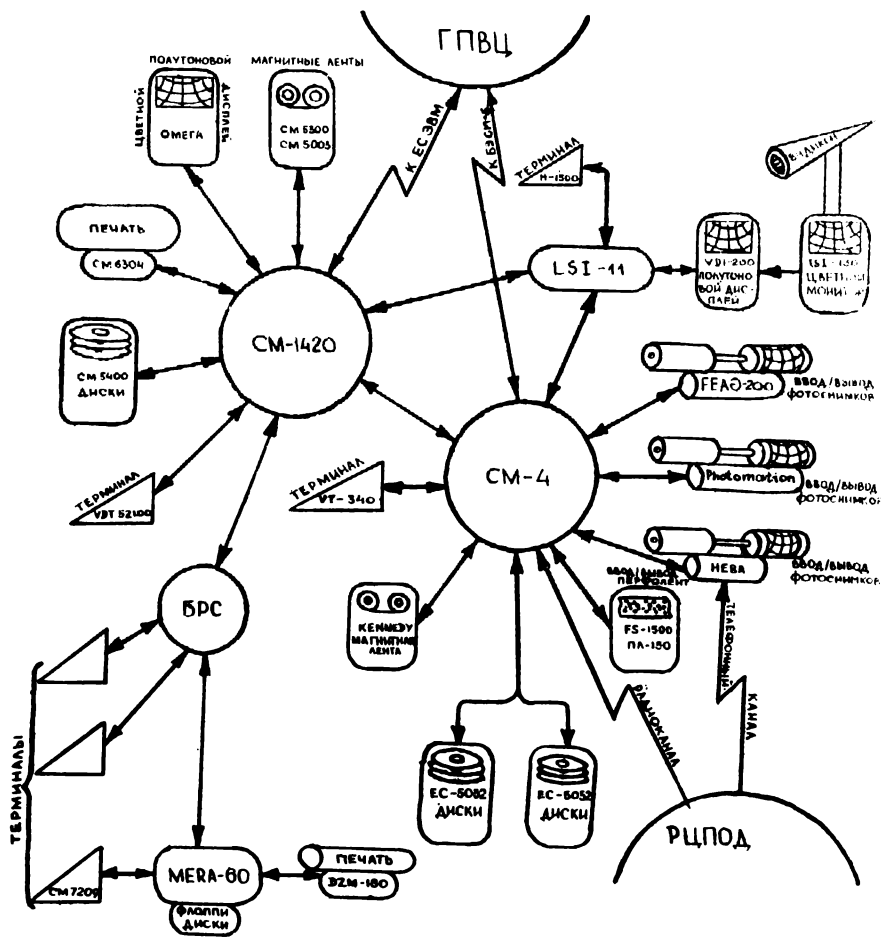


Рис.1.1. Технические средства центра обработки информации ВЦ СО АН СССР

На рис. I.2 представлена блок-схема технических средств цифровой картографической системы, предложенной в [I] .

Рассмотрим назначение отдельных подсистем.

Подсистема обработки одиночного снимка предназначена для организации процесса дешифрирования снимков. Подсистема обеспечивает ввод в ЭВМ различных типов снимков: фотографических, многозональных снимков МКФ-6, многоспектральных сканерных и радиолокационных снимков. Подсистема содержит устройства прецизионного ввода одиночного снимка (для последующего длительного хранения), устройства быстрого ввода изображений, устройства ввода многоспектральных сканерных снимков, записанных в цифровом виде на магнитных носителях, а также прямой канал ввода спутниковой информации.

Подсистема позволяет выполнять дешифрирование снимков в интерактивном режиме с использованием развитого пакета программ автоматической классификации объектов. Кроме того предусматривается выполнение фотометрической коррекции изображения и трансформирования исходных снимков.

Измерительная подсистема - состоит из стереокомпаратора и мини ЭВМ. Подсистема выполняет фототриангулирование в режиме " on-line ", позволяет оперативно вычислять координаты отдельных объектов с высокой точностью, обеспечивает вычисление данных, необходимых для высокоточного трансформирования цифрового изображения, геометрической коррекции систем ввода-вывода изображения и осуществления контроля за процессом обработки с точки зрения геометрической точности.

Автоматизированная стереофотограмметрическая подсистема предназначена для автоматизированного получения цифровой модели рельефа, рисовки горизонталей и ситуации.

Подсистема включает прецизионное устройство сканирования стереопары, цифровой коррелятор на основе матричного процессора и управляющей мини-ЭВМ.

Подсистема сбора картографической информации содержит графический сканер, управляемый мини-ЭВМ и позволяющий в автоматическом режиме считать отдельные элементы карты. Подсистема позволяет также в интерактивном режиме осуществлять редактирование картографической информации.

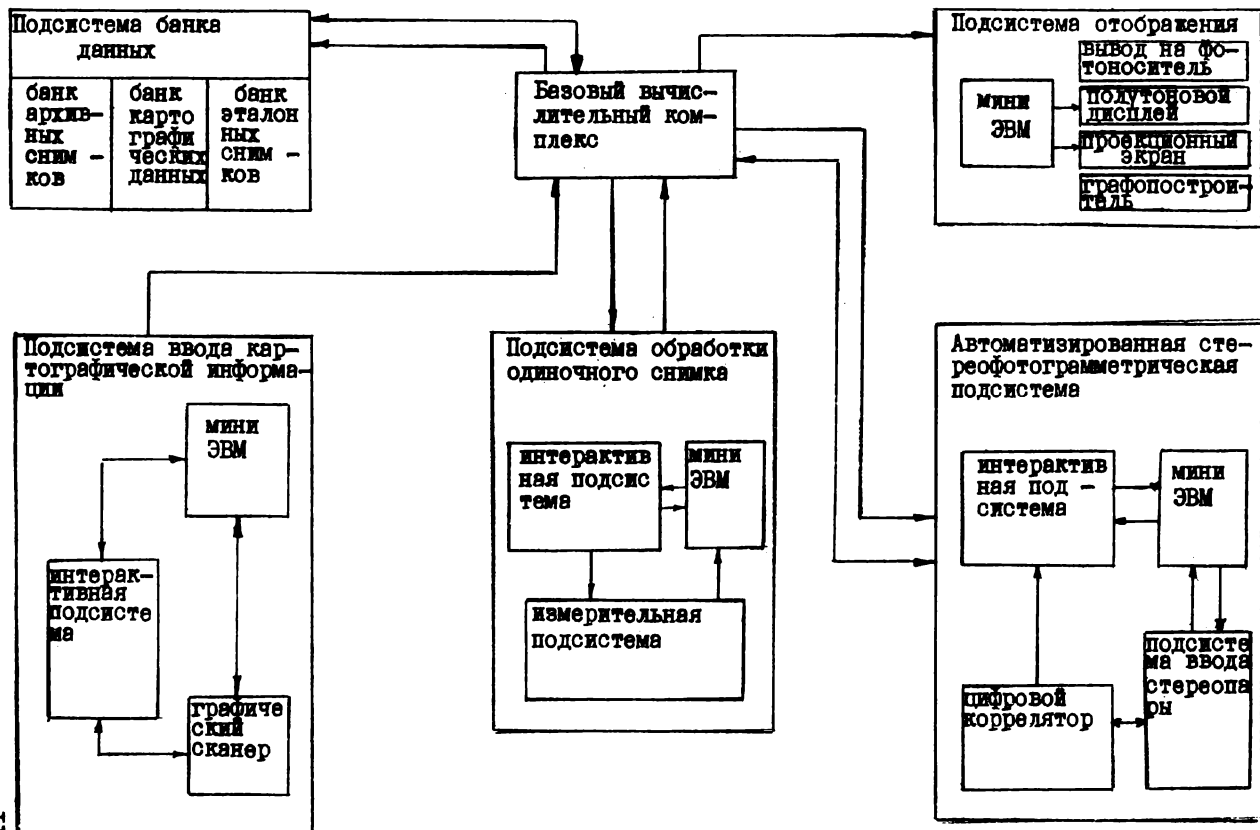


Рис. I.2. Технические средства цифровой картографической системы

Подсистема банка данных представлена в виде супербанка данных. Банк цифровой картографической системы должен содержать три группы данных, составляющие раздельные базы данных и имеющие централизованное управление: банк архивных снимков, банк картографических данных, банк эталонных снимков.

Банк архивных снимков содержит цифровые трансформированные снимки заданного масштаба. Эти снимки служат основой для оперативного автоматического выявления изменений происшедших на местности при обновлении карт. Кроме того, наличие этих снимков позволяет "просмотреть" изображение интересующего нас участка или же получить фотокарту местности.

Картографические данные представлены в виде информации о контурах местности, цифровой модели рельефа и каталога координат опорных пунктов и ориентиров.

Банк эталонных снимков содержит фотографические, многозональные снимки МКФ-6, многоспектральные сканерные снимки и радиолокационные снимки, представленные в стандартизованном цифровом виде на характерные участки местности, содержащие различные типы топографических объектов. Эти данные служат для дешифрирования объектов на снимках.

Подсистема отображения информации содержит устройства вывода изображения на фотоноситель, экран дисплея или проекционный экран, прецизионные графопостроители и графические дисплеи. Подсистема позволяет выводить информацию в виде фотокарты, трансформированного снимка, оригинала карты, в виде таблицы данных.

Рассмотрим принципы работы основных систем для цифровой обработки снимков: интерактивных дисплейных систем, спецпроцессоров устройств, используемых для хранения информации, устройств ввода-вывода изображения.

1.2. Интерактивные дисплейные системы

Для обеспечения интерактивного режима обработки изображений требуются специальные технические средства, позволяющие визуализировать растровое полутоновое цветное изображение на экране ЭЛТ, контролировать и активно управлять процессом обработки. Совокупность таких технических средств обычно называют дисплейным терминалом для обработки изображений или "рабочим мес-

том" для обработки изображения. Это минимальный набор средств, позволяющих выполнять некоторые операции цифровой обработки снимков.

Дисплейный терминал обеспечивает отображение на экране цветного монитора изображения форматом 512x512, 1024x1024, 2048x2048 или 4096x4096 элементов, имеет регенеративную память в которой хранится от 3 до 16 кадров изображения и обеспечивает регенерацию изображения на экране монитора со скоростью 25 + 50 кадров/с.

Большинство дисплейных терминалов имеют в своем составе специальный процессор видеосигналов (дисплейный процессор), который обычно содержит три идентичных процессорных модуля для каждого из основных цветов на экране монитора. Дисплейный процессор позволяет выполнять простые операции над изображением: сложение, вычитание, умножение, нелинейные преобразования и т.д. в реальном времени, то есть за время регенерации изображения на экране монитора. (Средняя производительность таких процессоров очень высокая до 50-70 млн. операций в секунду). Время доступа оператора к изображению также соответствует времени регенерации кадра.

Управление работой видеопроцессора и взаимосвязь с оператором обеспечивает управляющая мини-ЭВМ средней производительности (типа СМ-4).

Дисплейные процессоры современных систем обеспечивают выполнение в реальном времени ряд стандартных операций преобразования изображения:

- независимый перенос кадра в двух направлениях в плоскости изображения;
- увеличение масштаба изображения;
- одновременный вывод на экран различных фрагментов изображений;
- вычисление гистограммы яркостей всего изображения или фрагмента;
- псевдораскраску изображения;
- поворот изображения в своей плоскости;
- нелинейную деформацию изображения.

Дисплейная система имеет функциональную клавиатуру, устройство позиционирования (курсор). Курсор - это специальный символ, который выводится на экран (обычно в виде следящего креста). Курсор можно перемещать по экрану и "наводить" на любую

точку растра, то есть определять положение любого элемента изображения.

Рассмотрим основные характеристики дисплейных терминалов для обработки изображения.

В качестве "рабочих мест" для создания автоматизированных систем обработки изображений в СССР используются следующие дисплейные терминалы: "ОМЕГА", СВИТ, СПЕКТРОР-Д, Robotron, Pericolor.

Ниже приведены основные характеристики этих устройств.

1.2.1. Дисплейный терминал для анализа изображений "ОМЕГА"

Терминал "ОМЕГА" предназначен для автоматизированной обработки изображений в интерактивном режиме и может быть использован при решении следующих задач:

- цифровая обработка многозональных изображений, получаемых аэрокосмическими системами дистанционного зондирования для целей картографии, топографии и т.д.;
- редактирование и контроль цифровой информации о местности;
- анализ структур матричных фотоприемных устройств;
- автоматизированное проектирование;
- в областях науки и техники, где требуются обработка и отображение больших массивов видеоданных (медицина, метеорология, сельское хозяйство, мелиорация, лесное хозяйство и др.).

Терминал "ОМЕГА" позволяет:

- принимать цифровые видеоданные;
- воспроизводить на экране видеоконтрольного устройства черно-белые или цветные изображения в истинных или условных цветах;
- вести просмотр или поиск зоны, представляющей интерес;
- обрабатывать отдельно или совместно изображения в интерактивном режиме;
- выдавать обработанное изображение в цифровой форме.

Функционирование терминала "ОМЕГА" осуществлено по принципу конвейерного дисплейного процессора с программируемой архитектурой. Ввод/вывод информации, задание режимов работы устройства и программы обработки изображений реализуется с помощью мини-ЭВМ типа "СМ-4", "ЭЛЕКТРОНИКА 100-25", "ЭЛЕКТРОНИКА-60" и т.п. Блоки регенеративной памяти, быстродействующие функцио-

нальные преобразователи и арифметико-логические устройства, входящие в состав терминала, обеспечивают выполнение многих алгоритмов обработки изображений в реальном масштабе времени.

Имеется функциональное программное обеспечение в рамках дисковой операционной системы "РАФОС", а также специальный язык, допускающий преобразование данных на уровне описаний объектов и классов объектов, варьирование размеров изображений для оптимизации алгоритмов обработки и обращений к внешним носителям.

Технические характеристики

Скорость ввода цифровых данных	до 10 Мбайт/сек
Количество бит на передачу одной точки изображения	8
ЗУ видеоинформации:	
– базовый формат	512x512 точек
– количество банков	3
– базовый объем	768 кбайт
– длительность цикла записи/чтения	0,8 мкс
Скорость обработки изображений	10 Мбайт/с
Элементарные операции дисплейного процессора	сложение, вычитание, умножение, деление, линейные и нелинейные преобразования
Масштабирование в сторону увеличения	2,4,8 раз
Управление системой	клавиатура, трекбол

1.2.2. Самостоятельный видеоинформационный терминал (СВИТ)

СВИТ обеспечивает интерактивный режим обработки изображений в реальном масштабе времени. СВИТ позволяет получать цветное или черно-белое изображение 256x256 элементов. В качестве управляющей ЭВМ используется микро-ЭВМ "Электроника 60". Для ввода изображения используется устройство типа "видикон". Также можно обрабатывать изображения, записанные на магнитной ленте.

СВИТ позволяет выполнять следующие операции:

- выделять фрагменты изображения, менять их масштаб;
- синтезировать изображение;
- выполнять яркостные преобразования изображения;
- получать гистограммы яркостей изображения;

- осуществлять запись обработанного изображения на магнитную ленту или магнитные диски.

Функциональное программное обеспечение содержит программы:

- цветового кодирования - псевдораскрашивание снимков ;
- геометрических преобразований;
- статистического анализа;
- кластерного анализа;
- пространственно-частотного анализа.

Система СВИТ используется в институте космических исследований АН СССР и была применена при реализации проекта ВЕГА для изучения кометы Галлея.

1.2.3. Цифровая система обработки изображений "ROBOTRON"

В ГДР разработана и серийно выпускается цифровая система обработки изображений BVS-Robotron предназначенная для использования при решении широкого круга задач в области исследования природных ресурсов Земли, в картографии, медицине, промышленности. Система выпускается в нескольких модификациях А6471, А6472, А6473. Минимальная конфигурация А6471 включает мини-ЭВМ К1630, память на магнитных дисках и магнитных лентах, цветной дисплей 512x512 элементов, операторную консоль; печатающее устройство и устройство ввода-вывода FEAG. На рис.1.3 представлена структура системы А6472, предназначенной для быстрой обработки изображения и позволяющей хранить и обрабатывать большое количество изображений, выполнять контролирование процессов в реальном времени и быстрый анализ изображений. Система включает микро-ЭВМ К1620, оперативную память (ОП), память на дисках (МД), дисплейный процессор реального времени (ДПРВ), память для хранения изображения 1 Мбайт, цветной монитор (МТ), отображающий 512x512 элементов изображения, графический дисплей, устройство ввода-вывода изображения FEAG, а также прямой канал ввода и вывода изображения.

Для центров обработки изображений предназначен вариант системы А6473, которая включает четыре системы А6472, работающие в режиме разделения времени под управлением микро-ЭВМ К1620.

На рис.1.4 показана структура системы А6473.

Программное обеспечение системы включает все основные алгоритмы цифровой обработки изображений:

- кодирование изображений;
- восстановление изображений;

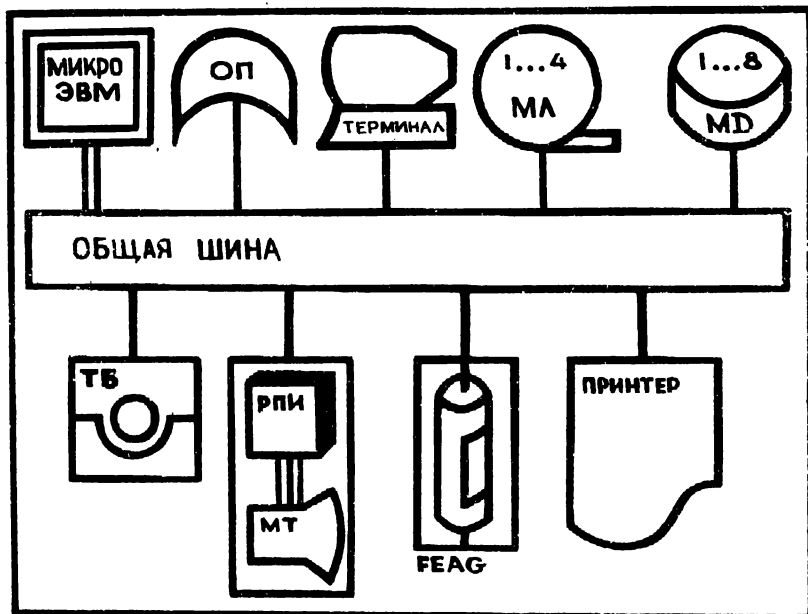


Рис.1.3. Структура цифровой системы обработки изображений А6472

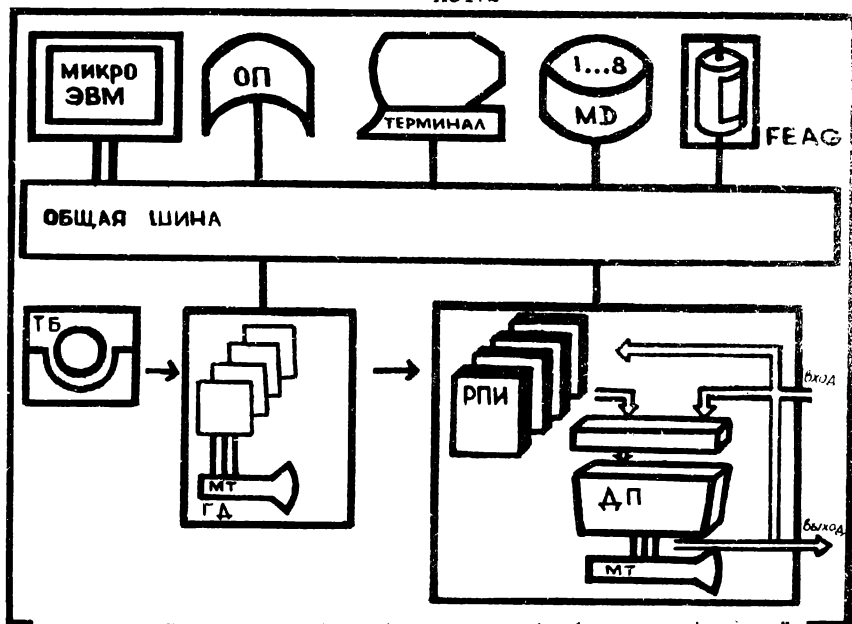


Рис.1.4. Структура цифровой системы обработки изображений А6473

- подчеркивание границ;
- улучшение изображений;
- распознавание образов;
- обработку многоспектральных снимков.

1.2.4. Интерактивная система цифровой обработки изображений DIAL-Digital Image Analysis Laboratory

DIAL - одна из наиболее совершенных зарубежных систем обработки изображений, используемая в Лаборатории корпуса военных топографов США [5]. Структура системы приведена на рис.1.5.

DIAL включает следующие технические средства:

- ЭВМ общего назначения СДС 6400 (ОЗУ емкостью 256 К 60-разрядных слов);
- сверхпроизводительный ассоциативный процессор двоичных массивов STARAN (1024 процессорных элемента);
- управляющие ЭВМ РДР II/20, РДР II/50 и РДР II/70;
- диалоговую систему, включающую пять рабочих мест на базе графических растровых дисплеев (ГРД) - Comtaif 8300 - SE;
- два графических дисплея ГВД;
- четыре графопостроителя планшетного типа;
- два устройства ввода-вывода снимков: одно - электронного типа на базе ЭЛТ, воспринимающего изображение - DICOME2 и оптико-механическое сканирующее устройство планшетного типа (MICRO - IO);
- устройства для хранения данных: магнитные ленты и магнитные диски.

Средняя пропускная способность системы для стандартных операций обработки изображения (фильтрация, дифференцирование, геометрические преобразования) - 15-50 Кбайт/сек.

1.3. Подсистема хранения информации

Цифровые снимки в центрах обработки изображений в виде отдельных файлов хранятся на магнитных дисках (МД) или магнитных лентах (МЛ). База данных обычно многоуровневая, включающая локальную базу данных, промежуточную и общую. Локальная база данных организуется в регенерационном запоминающем устройстве полупроводникового дисплея и на магнитных дисках управляющей ЭВМ. Локальную базу данных имеет каждое рабочее место (интерактивная дисплейная система).

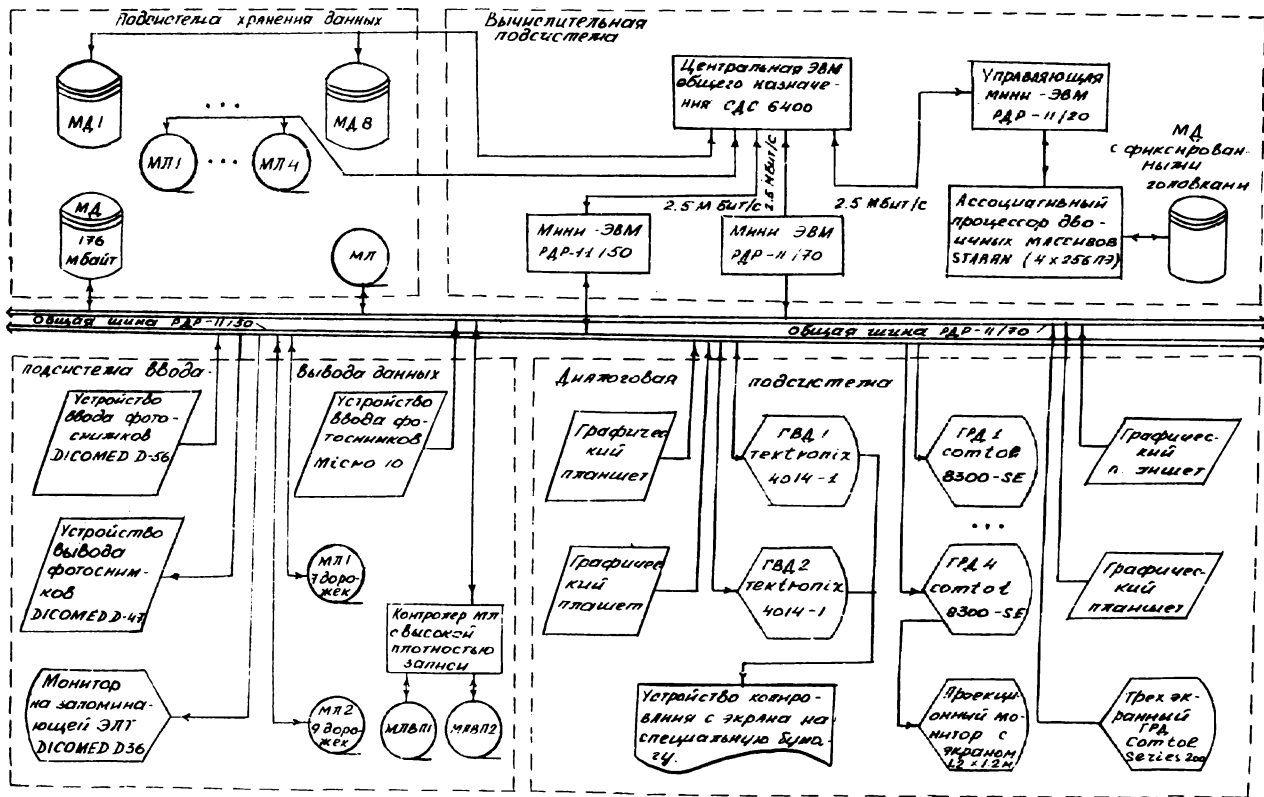


Рис.1.5. Структура цифровой системы обработки изображений DIAL

Промежуточная база данных размещается на МД доступных всем рабочим местам. Общая база данных служит для хранения архивной информации.

В таблице I.I приведены основные характеристики магнитных дисков, применяемых в СССР.

Таблица I.I

Характеристика	На з в а н и е						
	ЕС	ЕС	ЕС	ЕС	ЕС	ЕС	ЕС
	5056	506I	5066M		5067	5080	5063.0I
Емкость Мбайт	7.25	29	100	100	200	200	317
Время доступа к информации (МС)	90	62	55	83	83	48	23
Скорость обмена Кбайт/с	156	312	806	806	806	806	1198

Для организации общих баз данных объединяют несколько МД через специальный управляющий модуль. Например, УМ5663.0I обеспечивает подключение до 8 накопителей на МД ЕС 5063.0I.

I.4. Программное обеспечение систем цифровой обработки изображений

Эффективность систем обработки изображений определяется качеством программного обеспечения. Создание гибкого программного обеспечения - дело чрезвычайно трудоемкое. Для достижения "среднего" уровня затрачивается до 400 чел/лет.

Программное обеспечение разделяется на системное и функциональное.

Системные программы организуют взаимодействие отдельных устройств системы, управляют потоками данных внутри системы, осуществляют преобразования введенных данных к единому формату, подготавливают и обеспечивают вывод данных в требуемой форме, осуществляют контроль за функционированием отдельных устройств, распределяют ресурсы системы.

К системным программам относятся все программы обеспечивающие ввод и вывод изображений: программы организации файла изображения, программы преобразования изображения, поступающие из различных устройств к единому формату, программы вывода на экран дисплея всего изображения или отдельного фрагмента и т.д.

Системные программы организуют диалог пользователя с системой – обеспечивают интерактивный режим работы: например, позволяют осуществлять позиционирование элемента изображения с помощью курсора, выполняют стандартные преобразования изображения типа – преобразование негатива в позитив, выделение "окна", изменение масштаба и т.д.

Таким образом, системные программы, по-существу, являются расширением используемой операционной системы.

Прикладное программное обеспечение систем обработки изображений разрабатывается на языках высокого уровня – ФОРТРАН, ПАСКАЛЬ, ПЛ-1. Учитывая большие затраты времени при программировании различных задач обработки изображения, ведутся работы по созданию специального языка обработки изображений.

Прикладное программное обеспечение реализует непосредственно алгоритмы обработки изображений, выполняющие целевую обработку. Среди этих программ большая часть выполняет типовые преобразования изображения.

Для решения конкретной задачи программу "собирают" из типовых модулей и при необходимости создают специальные целевые программные модули.

Рассмотрим основные операции, реализованные в программном обеспечении большинства автоматизированных систем обработки изображений [5].

Программы – утилиты:

- выделение фрагментов изображения;
- манипулирование файлами изображений на магнитных дисках и магнитной ленте;
- совмещение полутоновых кадров с координатными сетками;
- формирование гистограмм распределения яркостей.

Программы яркостного поэлементного преобразования изображения:

- квантование значения яркостей;
- преобразование шкалы яркостей (линейное, логарифмическое, экспоненциальное);
- псевдораскраска изображения.

Геометрические преобразования:

- перекося, поворот изображения;
- изменение масштаба снимка;
- трансформирование в заданную картографическую проекцию;

- устранение геометрических искажений на базе полиномиальных преобразований.

Программы "улучшения изображения":

- фильтрация с произвольным фильтром - маской с целью подчеркивания границ, устранения шумов;

- программы дифференцирования изображения с целью подчеркивания контуров, выделения границ.

Программы спектрального анализа:

- быстрое преобразование Фурье;

- быстрое преобразование Адамара;

- нелинейное преобразование частотного спектра.

Программы классификации образов (автоматического дешифрирования):

- на основе Байесовского подхода;

- на основе кластерного анализа;

- обучения классификатора по тестовым снимкам.

В разделах 3,4 и 5 подробно рассмотрена сущность преобразований изображения реализованных в данных программах. Эти преобразования выполняются с целью:

- улучшения восприятия изображений для выполнения визуального дешифрирования снимков;

- выделения отдельных объектов на снимках - для улучшения дешифрирования снимков;

- устранения геометрических и фотометрических ошибок изображения;

- выделения дешифровочных признаков изображения для автоматического распознавания объектов.

С фотограмметрической точки зрения полное программное обеспечение должно обеспечивать выполнение следующих процессов:

- устранение всех ошибок снимка, трансформирование снимков в заданную проекцию и вывод изображения на фотоноситель (получение фотоплана);

- автоматизированное дешифрирование всех топографических объектов и графическое отображение объектов в условных знаках;

- автоматическую идентификацию точек стереопары и рисовку рельефа с получением стереомодели на экране дисплея;

- автоматическое построение цифровой модели местности в стереопаре снимков.

До настоящего времени проблемы цифровой стереофотограмметрии не решены, однако в обработке одиночных снимков имеются определенные успехи, в частности в вопросах автоматического дешифрирования снимков.

1.5. Применение цифровых методов обработки снимков при создании карт

Что можно ожидать от применения цифровых методов обработки снимков в фотограмметрии? Хотя в настоящее время нет фотограмметрических технологий, основанных на использовании цифровых методов, можно определить возможные сферы их использования.

Наметившаяся в последнее время тенденция перехода к созданию цифровых карт и топографо-картографических банков данных является решающим фактором определяющим скорейший переход к внедрению цифровых методов обработки снимков в фотограмметрию. Только на основе этих методов возможна автоматизация всех процессов составления карт по снимкам и в соответствии с этим возможность повысить производительность труда, уменьшить численность сотрудников, занятых фотограмметрическими работами.

Применение цифровых методов обеспечивает:

- улучшение фотографического качества снимков: устранение смаза, вызванного движением носителя в момент съемки, повышение резкости изображения (путем улучшения ЧХХ системы АФА-атмосфера средствами цифровой коррекции), устранение дефектов изображения - царапин, точек и т.д.;
- устранение различных геометрических ошибок снимка, вызванных дисторсией объектива АФА, деформацией фотоматериала, атмосферной рефракцией и т.д.;
- трансформирование и ортотрансформирование снимков;
- монтирование фотоплана из отдельных снимков;
- автоматизацию дешифрирования снимков;
- автоматизацию составления плановой части карты;
- составление цифровых карт по снимку: формирование файлов цифровой информации топографической карты и запись ее на магнитные диски и магнитные ленты;
- составление и отображение фотокарты и фотоплана на цветном мониторе или регистрация на фотоносителе.

Цифровые методы можно использовать и для обработки стереопар снимков и на их основе решать задачи автоматизации стереоиз-

мерений и рисовки горизонталей. Однако несмотря на интенсивные исследования в этой области пока не создано работоспособных надежных алгоритмов, пригодных для выполнения производственных работ.

Рассмотрим использования цифровых систем для выполнения следующих видов работ:

- создание фотоплана;
- дешифрирование снимков;
- составление плановой части карты.

Создание фотоплана включает следующие процессы:

- ввод снимков в ЭВМ, получение цифрового изображения;
- ввод координат опорных точек и вычисление элементов трансформирования снимка;
- цифровое трансформирование снимков: вычисление исправленных координат элементов изображения цифрового снимка и перемещение соответствующего элемента в новое положение;
- монтирование цифрового фотоплана, то есть формирование непрерывного цифрового изображения путем объединения соседних снимков с учетом зоны перекрытия;
- вывод изображения на фотопленку.

Если имеется цифровая модель рельефа на данный участок, то можно выполнить цифровое ортотрансформирование снимков, то есть получить цифровое изображение с учетом поправок за рельеф.

Точность такого ортотрансформирования на порядок выше, чем при использовании для трансформирования аналоговых устройств, и ограничена лишь размерами элемента цифрового изображения (10x10 мкм или 25x25 мкм).

Дешифрирование снимков с использованием цифровых систем обработки изображений выполняется в интерактивном режиме в следующей последовательности:

- ввод снимка в ЭВМ;
- отображение снимка на экране монитора;
- преобразование снимков с целью выделения дешифровочных признаков, отображение преобразованного снимка на экране, просмотр и анализ снимков дешифровщиком;
- автоматическое распознавание топографических объектов с использованием процедур Байесовской классификации или кластерного анализа;

- отображение дешифрованных объектов в условных знаках на экране монитора;
- вывод полученного изображения на фотопленку.

Составление плановой части карты будет включать следующие процессы:

- ввод снимков в ЭВМ;
- цифровое трансформирование снимков и монтирование цифрового фотоплана;
- дешифрирование снимков;
- формирование файлов цифровой информации о плановой части составляемой карты на основе результатов дешифрирования снимка (отслеживание контуров и отдельных объектов может выполняться в автоматическом или интерактивном режимах);
- отображение полученного оригинала карты на экране монитора и редактирование;
- вычерчивание оригинала карты с помощью автоматического координатографа;
- формирование цифровой фотокарты: совмещение цифровой карты и трансформированного снимка;
- вывод фотокарты фотопленку.

Рассмотренные выше варианты применения цифровых методов в фотограмметрии практически не реализованы. Существующие алгоритмы позволяют выполнять лишь отдельные этапы обработки и не объединены единой технологией. Имеются отдельные сведения о создании методик для отдельных видов обработки снимков. Например, для дешифрирования материалов дистанционного зондирования (рис.1.6) или же трансформирования снимков в заданную картографическую проекцию.

Предстоит большая работа по созданию технологии цифровой обработки снимков для создания топографических карт.

2. УСТРОЙСТВА ВВОДА-ВЫВОДА ИЗОБРАЖЕНИЯ

2.1. Принцип получения цифрового изображения

Устройства ввода обеспечивают преобразование исходного изображения в цифровую форму. Принцип получения цифрового изображения показан на рис.2.1. Снимок (в виде негатива или для позитива) устанавливается на столике и освещается. Свет проходит через изображение, объектив и фокусируется на приемнике излучения, где

формируется электрический сигнал. Полученный сигнал квантуется и кодируется. В результате получаем численное значение интегральной яркости соответствующего элемента изображения. Размер элемента определяется размерами апертуры приемника. Обычно используется квадратная апертура 25x25 мкм, 50x50 мкм, 100x100 мкм или 200x200 мкм.

Преобразование всего снимка осуществляется путем последовательного получения цифровых значений яркости каждого элемента изображения. Для этого снимок сканируется в двух взаимно перпендикулярных направлениях. путем перемещения чувствительного элемента. При этом через интервал ΔX , равный ширине элемента, фиксируются значения яркостей следующего элемента изображения. После "просмотра" снимка вдоль оси X чувствительный приемник перемещается на ширину элемента и сканирование осуществляется в обратном направлении. Обычно в устройствах ввода перемещают не чувствительный элемент, а снимок как это и показано на рисунке. Необходимость высокой скорости сканирования вызвала широкое распространение устройств ввода-вывода барабанного типа (рис.2.2). В таких системах снимок устанавливается на барабан внутри которого находится осветитель. Соосно с ним расположен чувствительный элемент. Барабан вращается с высокой скоростью и за каждый оборот барабана записываются значения всех элементов соответствующей строки снимка. После каждого оборота барабана каретка с приемником передвигается на ширину одной линии сканирования.

Таким образом устройство ввода имеет осветитель, сканирующее устройство, чувствительный элемент, кодирующее устройство.

Преобразование цифрового изображения в фотографическое осуществляется посредством устройств подобного типа.

Обычно устройство ввода и вывода изображения объединяются в одну систему. Сканирование при выводе изображения осуществляется по такому же закону как и при вводе. При этом фотоматериал последовательно экспонируется световым пятном, яркость которого пропорциональна значению соответствующего элемента цифрового изображения. Размеры светового пятна равны размерам элемента изображения.

На рис.2.3 и рис.2.4 показаны устройства вывода изображения барабанного и планшетного типов соответственно.

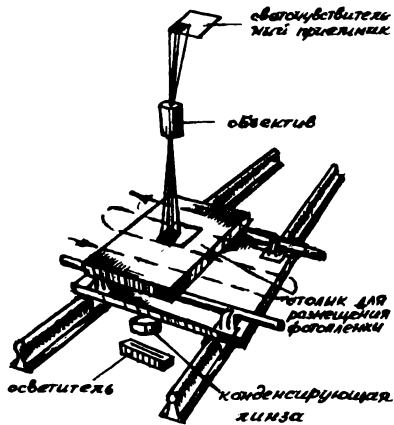


Рис.2.1. Устройство ввода
планшетного типа

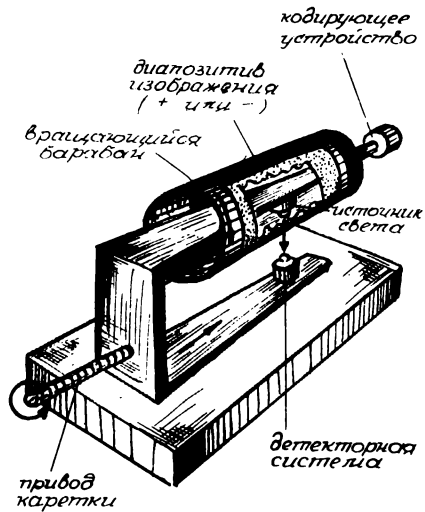


Рис.2.2. Устройство ввода
барабанного типа

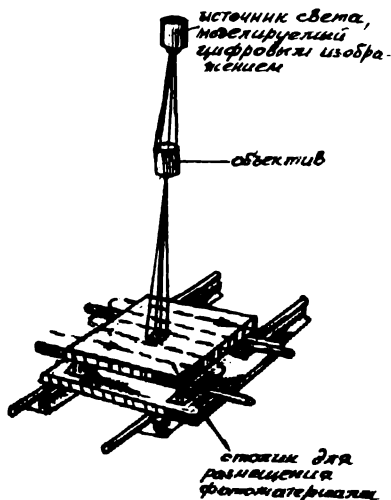


Рис.2.3. Устройство вывода
планшетного типа

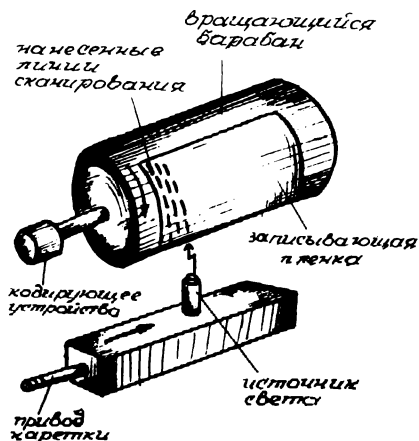


Рис.2.4. Устройство вывода
барабанного типа

2.2. Математическая модель работы устройств ввода-вывода изображения

2.2.1. Получение цифрового изображения. Формализация (описание) работы устройства ввода

Получение цифрового изображения связано с двумя процессами: дискретизацией изображения и квантованием уровня яркости элементов изображения. Оба процесса происходят одновременно, однако для анализа их удобно рассматривать отдельно.

Дискретизация изображения. Получение цифрового изображения можно рассматривать как переход от непрерывной функции $F_I(x, y)$ — исходного изображения, к функции, заданной дискретно в узлах сетки с шагом ΔX и ΔY . Этот переход описывается действием некоторой функции $S(x, y)$ называемой дискретизирующей на исходное изображение: цифровое изображение $F_p(x, y)$ получается в результате перемножения исходной и дискретизирующей функции:

$$F_p(x, y) = F_I(x, y) S(x, y) \quad (2.1)$$

Тогда идеальную дискретизирующую функцию $S(x, y)$ можно представить как набор дельта-функций Дирака, заданных в узлах решетки с шагом ΔX , ΔY :

$$S(x, y) = \sum_{j_1=-\infty}^{\infty} \sum_{j_2=-\infty}^{\infty} \delta(x - j_1 \Delta x, y - j_2 \Delta y), \quad (2.2)$$

здесь

$$\delta(x, y) = \begin{cases} \infty, & x=0, y=0; \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (2.3)$$

Учитывая свойство дельта функции (2.3) выражение (2.1) можно записать как

$$F_p(x, y) = \sum_{j_1=-\infty}^{\infty} \sum_{j_2=-\infty}^{\infty} F_I(j_1 \Delta x, j_2 \Delta y) \delta(x - j_1 \Delta x, y - j_2 \Delta y), \quad (2.4)$$

где $F_I(j_1 \Delta x, j_2 \Delta y)$ - функция $F_I(x, y)$ заданная только в узлах решетки.

Итак, для получения цифрового изображения посредством идеальной системы дискретизации достаточно измерить исходную функцию в узлах дискретизации.

Чтобы решить сколько необходимо иметь узлов дискретизации для точного (без потери информации) представления изображения в цифровом виде необходимо обратиться к анализу частотных свойств изображения. Спектр дискретизированного изображения можно получить, выполнив преобразование Фурье функции $F_p(x, y)$:

$$F_p(W_x, W_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} F_p(x, y) \exp\{-i(W_x x + W_y y)\} dx dy \quad (2.5)$$

или же как свертку спектра исходной к дискретизирующей функции

$$F_p(W_x, W_y) = \frac{1}{4\pi^2} F_I(W_x, W_y) * G(W_x, W_y) \quad (2.6)$$

Учитывая, что спектр идеальной дискретизирующей функции имеет вид:

$$G(W_x, W_y) = \frac{4\pi}{\Delta x \Delta y} \sum_{j_1=-\infty}^{\infty} \sum_{j_2=-\infty}^{\infty} \delta(W_x - j_1 W_{x_0}, W_y - j_2 W_{y_0}), \quad (2.7)$$

где $W_{x_0} = \frac{2\pi}{\Delta x}$; $W_{y_0} = \frac{2\pi}{\Delta y}$ частота дискретизации.

Спектр полученного изображения можно получить, вычисляя свертку (2.6) [II] :

$$F_p(W_x, W_y) = \frac{1}{\Delta x \Delta y} \sum_{j_1=-\infty}^{\infty} \sum_{j_2=-\infty}^{\infty} F_1(W_x - j_1 W_{x_s}, W_y - j_2 W_{y_s}) \quad (2.8)$$

Выражение (2.8) показывает, что спектр дискретизированной функции $F_p(W_x, W_y)$ получается бесконечным повторением спектра исходной функции с периодом $W_{x_s} = 2\pi/\Delta x$; $W_{y_s} = 2\pi/\Delta y$. Рисунок 2.5 иллюстрирует это свойство, которое и определяет основной принцип выбора интервала дискретизации Δx , Δy . Потери информации отсутствуют, если соседние спектры дискретизированного изображения не перекрываются, то есть если предельная частота исходного изображения W_{x_s1} , W_{y_s1} меньше половины частоты дискретизации W_{x_s} , W_{y_s} :

$$W_{x_s1} \leq W_{x_s}/2 \quad ; \quad W_{y_s1} \leq W_{y_s}/2 \quad (2.9)$$

то есть

$$\Delta x = \pi/W_{x_s1} \quad ; \quad \Delta y = \pi/W_{y_s1} \quad (2.10)$$

И получаем основное правило дискретизации, определяемое теоремой Котельникова: любая функция не содержащая частот выше W_{x_s1} может быть передана сколь угодно точно с помощью отсчетов следующих друг за другом через интервал $1/2 W_{x_s1}$ (то есть на предельную частоту необходимо иметь не менее двух отсчетов).

Пример. Если съемка выполнялась аэрофотоаппаратом ТАФА-10, то разрешающая способность на снимке около 13 лин/мм. Тогда для получения цифрового изображения без ошибок дискретизации необходимо размер элемента выбрать не более 30 мкм.

Если условие (2.9) не выполняется, то по цифровому изображению нельзя будет точно восстановить исходное изображение. Визуально это проявится не только в уменьшении резкости изображе-

ния, но и в появлении так называемых ложных частот или муарового эффекта.

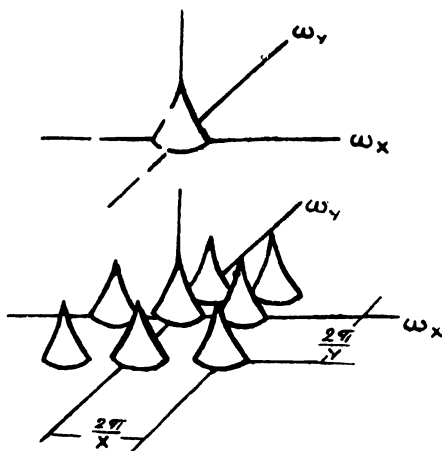


Рис.2.5. Спектр дискретизированного изображения

Все приведенные выше рассуждения относятся к идеальным системам получения цифрового изображения. Реальные системы отличаются следующим:

1) реальный импульсный отклик устройства дискретизации отличается от дельта функции Дирака и реальная дискретизирующая функция может быть получена сверткой дельта-функции Дирака и реального импульсного отклика $P(x, y)$:

$$\begin{aligned}
 S(x, y) &= D_T(x, y) * P(x, y) = \\
 &= \sum_{j_1=-J_1}^{J_1} \sum_{j_2=-J_2}^{J_2} (x - j_1 \Delta x, y - j_2 \Delta y), \quad (2.II)
 \end{aligned}$$

здесь $D_T(x, y)$ - конечный набор дельта функции, заданный на решетке размерами $(2J_1 + 1)(2J_2 + 1)$ с шагом $\Delta x, \Delta y$:

$$D_r(x, y) = \sum_{j_1=-j_1}^{j_1} \sum_{j_2=-j_2}^{j_2} \delta(x - j_1 \Delta x, y - j_2 \Delta y), \quad (2.12)$$

Переход от бесконечной решетки дискретизации (2.2) к конечной приводит к ошибкам на краях изображения.

2) В реальных системах значения функции $F_I(x, y)$ в узлах дискретизации $F_I(j_1 \Delta x, j_2 \Delta y)$ получаются путем интегрирования функции $F_I(x, y)$ по элементу изображения j_1, j_2 (физически, излучение прошедшее через элемент j_1, j_2 интегрируется на апертуре приемника). С учетом этого численное значение элемента цифрового изображения с номером j_1, j_2 можно вычислить по формуле:

$$F_S(j_1, j_2) = \int_{j_1 \Delta x - A_x}^{j_1 \Delta x + A_x} \int_{j_2 \Delta y - A_y}^{j_2 \Delta y + A_y} F_I(x, y) P(x - j_1 \Delta x, y - j_2 \Delta y) dx dy \quad (2.13)$$

Здесь A_x, A_y - размеры элемента изображения.

Выполнив интегрирование можно представить выражение (2.13) в виде [II]:

$$F_S(j_1, j_2) = [F_I(x, y) * P(-x, -y)] \delta(x - j_1 \Delta x, y - j_2 \Delta y) \quad (2.14)$$

Итак, для получения отсчетов цифрового изображения необходимо знать импульсный отклик устройства ввода $P(x, y)$. Отличие импульсного отклика от идеального $\delta(x, y)$ приводит к "смазыванию" изображения при вводе его в ЭВМ. Таким образом, качество устройства ввода можно оценить определив импульсный отклик (ЧКХ устройства ввода).

К в а н т о в а н и е . Одновременно с дискретизацией изображения устройство ввода выполняет квантование значений

$F_I(x, y)$ по уровню яркости.

Квантование заключается в замене непрерывного распределения яркости $F(x, y)$ дискретными значениями. Для этого весь диапазон возможных яркостей разбивается на K интервалов ΔB_j и значению яркости конкретного элемента B_j , попавшему в интервал B_i, B_{i+1} , присваивается значение $B_{i,cp} = B_i + B_{i+1}/2$. В некоторых системах квантования значению B_j присваивается одно из граничных значений интервала, например B_i или B_{i+1} .

При выполнении квантования необходимо выбрать количество уровней квантования ΔB и тип шкалы квантования.

Количество уровней квантования в большинстве цифровых систем выбирается с учетом предельных свойств человеческого зрения. Известно, что человек может различить объекты на изображении, если яркости объекта и фона отличаются на некоторую определенную величину $\Delta B_{пред}$. Причем эта величина изменяется в зависимости от яркости фона и размеров объекта. Объект можно зрительно выделить на изображении, если его контраст не меньше порогового

$$\gamma_{пред} = \frac{\Delta B}{B_{\phi}}, \quad (2.15)$$

где $\Delta B = B_o - B_{\phi}$,

B_o, B_{ϕ} - яркость объекта и фона соответственно.

Для хороших условий наблюдения $\Delta B_{пред} = 0.02$.

Количество уровней квантования без потери информации для визуального наблюдения можно определить по следующей формуле [14]

$$m = \frac{1}{\int} \int_{B_{min}}^{B_{max}} \frac{dB}{B} = \frac{1}{\int} \ln \frac{B_{max}}{B_{min}} \quad (2.16)$$

Учитывая, что динамический диапазон реальных изображений ограничен и $B_{max}/B_{min} \approx 100$ получим $m \approx 230$. Практически обычно используют 256 уровней квантования, что объясняется удобством представления такого числа в ЭВМ (2^8).

Заметим, что при разработке цифровых измерительных фотографических систем количество уровней квантования следует выби -

рять исходя из других принципов. Нужно учитывать возможность машины выделить объект на некотором фоне. Эта возможность связана с шумовыми характеристиками системы δB . То есть количество уровней должно быть выбрано с учетом отношения сигнал/шум:

$$K_s = \frac{\Delta B}{\delta B} \quad (2.17)$$

Шкала квантования. Обычно используют два типа шкал квантования: равномерную и логарифмическую. При использовании равномерной имеем $\Delta B = (B_{max} - B_{min})/K$ для логарифмической шкалы - $\Delta B_L = (\log B_{max} - \log B_{min})/K$. Использование логарифмической шкалы предпочтительнее для систем, ориентированных на визуальный просмотр. Это объясняется тем, что глаз реагирует на изменение логарифма плотности и равномерной для человека будет казаться логарифмическая шкала плотностей. Поэтому для обеспечения оптимальной передачи изображения следует увеличить количество отсчетов малых яркостей изображения, что и обеспечивает логарифмическая шкала квантования.

2.2.2. Визуализация изображения. Вывод изображения из ЭВМ

При решении задачи восстановления непрерывного изображения по дискретному цифровому изображению $F(x, y)$, необходимо выполнить интерполирование значений $F_p(j_1, j_2)$, так, чтобы точно восстановить $F(x, y)$. Это осуществляется с помощью некоторой интерполирующей двумерной функции $R(x, y)$. Тогда изображение на выходе системы будет определяться сверткой цифрового изображения и интерполирующей функции (импульсным откликом интерполирующего фильтра)

$$F_R(x, y) = F_p(x, y) * R(x, y) \quad (2.18)$$

Интерполирующая функция должна быть выбрана таким образом, чтобы спектр полученного изображения совпадал со спектром исходного изображения, а для этого нужно, чтобы интерполирующий фильтр подавлял все частоты выше частоты дискретизации W_{x_s} , W_{y_s} . При этом, если дискретизация выполнялась в соответствии с теоремой Котельникова, будет восстановлено точное значение исходного изо-

бражения.

Условием точного восстановления исходного изображения $F_T(x, y)$ удовлетворяет ряд функции $R(x, y)$.

Например, так называемый прямоугольный фильтр, частотная характеристика которого имеет вид

$$R(W_x, W_y) \begin{cases} = K & \text{при } \begin{cases} W_x \leq W_{xL} \\ W_y \leq W_{yL} \end{cases} \\ = 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (2.19)$$

К аналогичным результатам приводит и использование "кругового" фильтра с характеристикой

$$R(W_x, W_y) \begin{cases} = K & \text{при } \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \leq W_{\text{max}} \\ = 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (2.20)$$

Функция $R(x, y)$, соответствующая прямоугольному фильтру, имеет вид

$$R(x, y) = \frac{(K W_{xL} W_{yL} / \pi^2) [\sin W_{xL} x / W_{xL} x]}{(\sin W_{yL} y / W_{yL} y)}, \quad (2.21)$$

а для кругового фильтра:

$$R(x, y) = 2\pi \omega_0 (J_1 \{W_0 \sqrt{x^2 + y^2}\} / \sqrt{x^2 + y^2}) \quad (2.22)$$

где J_1 — Бесселева функция первого порядка.

Однако на практике задача точного воспроизведения изображения по цифровому решается значительно сложнее, так как физически трудно создать устройства вывода изображения с требуемой формой

импульсного отклика. Так, функции вида (2.21) или (2.22) вообще нельзя сформировать оптическими средствами.

Итак, для восстановления изображения необходимо создать определенное распределение яркости для светового пятна, формирующего изображение, такое, чтобы общая характеристика всего канала имела импульсный отклик, близкий к оптимальному.

Отличие реальной интерполирующей функции $R(x, y)$ от идеальной приводит к ухудшению резкостных свойств изображения и в некоторых случаях к появлению ложных высокочастотных составляющих.

2.3. Устройство реальных систем ввода-вывода изображения

2.3.1. Классификация систем

Существуют разнообразные устройства ввода-вывода изображения, имеющие различное назначение, стоимость, быстродействие. По способу сканирования можно выделить три типа систем:

- 1) электронные сканеры, использующие электронно-лучевые трубки, формирующие изображения;
- 2) электро-но-оптические механические сканеры, использующие одноэлементные приемники излучения;
- 3) устройства, использующие многоэлементные приемники излучения.

Способ сканирования определяет быстродействие, геометрическую и фотометрическую точность устройств. Так, электронные сканеры на ЭЛТ обеспечивают максимальную скорость ввода и вывода изображения, однако вносят существенные (до 10-15 %) геометрические искажения. Кроме того, они имеют малый динамический диапазон и вносят существенные фотометрические искажения. Одно из основных достоинств электронных сканеров - низкая стоимость. Естественно, что такие системы целесообразно использовать при решении задач оперативного контроля для визуального просмотра изображений и результатов обработки. Для измерительных картографических целей эти устройства не пригодны.

Оптико-электронные механические устройства наиболее широко используются в практике цифровой обработки аэрокосмических снимков. Они обеспечивают максимальную геометрическую и фотометрическую точность передачи изображения, однако в быстродействии значительно уступают системам электронного типа. Сканирование в оп-

тики в электронных устройствах может осуществляться по-разному. Существуют системы барабанного типа (где сканирование осуществляется за счет вращающегося с высокой скоростью барабана) и системы планшетного типа, выполняющие считывание с плоского столика. Использование плоского столика позволяет получить наилучшую геометрическую точность, однако это наиболее медленный способ сканирования.

Устройства, использующие многоэлементные приемники излучения объединяют в себе быстрдействие электронного способа сканирования и высокую геометрическую точность, обеспечиваемую использованием плоского столика для размещения негатива. В таких устройствах чувствительные элементы (фотодиоды, фоторезисторы или фототранзисторы) объединяют в виде линейки или двумерной решетки — матрицы. В первом случае для просмотра снимка линейку перемещают вдоль одной из осей. К многоэлементным приемникам относят также и приборы с зарядовой связью (ПЗС), которые обладают хорошей чувствительностью и являются весьма перспективными для использования в устройствах ввода изображения. Основным недостатком таких устройств — сложность изготовления и высокая стоимость.

Рассмотрим конкретные реализации устройств каждого из типов.

2.3.2. Приборы использующие ЭЛТ

К электронно-лучевым трубкам воспринимающим изображение относятся ЭЛТ типа видикон, кремникон, суперортикон.

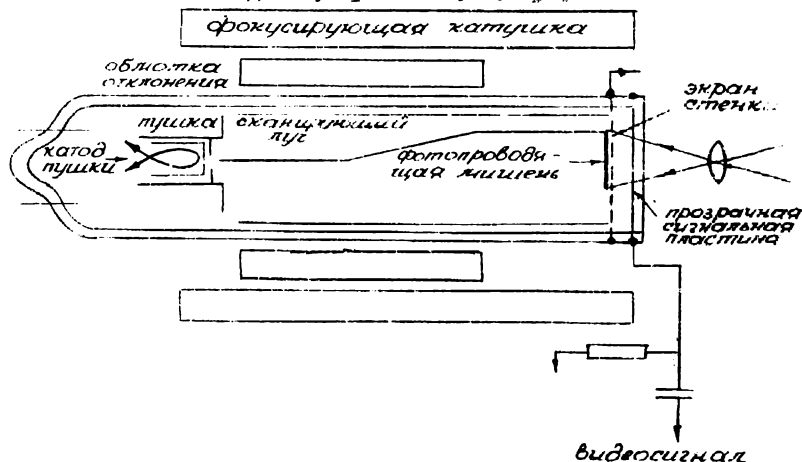


Рис.2.6. Устройство ЭЛТ, воспринимающей изображение (видикона)

На рис.2.6 представлена схема тнщичного видикона. Изображение с помощью объектива проектируется на экран ЭЛТ, который представляет собой фотопроводящую мишень. Сканирование мишени выполняется электронным путем. Под действием света уменьшается сопротивление освещенных участков мишени и в соответствии с этим изменяется ток на нагрузочном сопротивлении. В результате ток пропорционален сопротивлению фотопроводящей мишени и следовательно яркости вводимого изображения. Сканирование экрана (мишени) в таких системах осуществляется пятном определенного размера, причем используется построчно-линейное или чересстрочное сканирование. Устройства типа "кремникон" и "ортикон" с точки зрения сканирования действуют аналогично, хотя и используют для формирования видеосигнала другие физические принципы.

2.3.3. Устройства электронно-оптического типа с механическим сканированием

Учитывая наиболее широкое распространение таких систем рассмотрим их более подробно.

Фототелеграфный аппарат "Нева". Фототелеграфный аппарат Нева был первым отечественным устройством ввода-вывода изображения, применявшимся при цифровой обработке. Он основан на использовании принципа отражения. Такое устройство может вводить только изображения на непрозрачной основе (контактные отпечатки снимков на фотобумаге).

Фотографическое изображение, предназначенное для передачи устанавливается на барабан, приводимый во вращение синхронным двигателем. Вдоль образующей барабана, с помощью ходового вилка, вращаемого тем же двигателем, равномерно перемещается каретка с укрепленной на ней анализирующей оптической системой. Эта система состоит из осветителя и фотоумножителя. Осветитель формирует на изображении световое пятно определенных размеров и формы. Отраженный световой поток проходит через объектив и фокусируется на фотокатоде приемного устройства. При равномерном передвижении каретки световое пятно описывает винтовую линию на поверхности вращающегося барабана. Таким образом, происходит сканирование передаваемого изображения и при этом напряжении на нагрузке будет изменяться в соответствии с яркостью элементов изображения. Затем, полученный сигнал кодируется и таким образом формируется цифровое изображение. Аналогично происходит визуализация изображения. При этом фоточувствительный материал сканируется подобным

образом световым пятном, яркость которого моделирована цифровым изображением.

К оптико-механическим приборам барабанного типа относятся также "Формат IIO" (СССР), Ромб (СССР), FEAG (ГДР), Photomation (США), Visumat (Франция). Основные характеристики этих приборов приведены в таблице 2.1. В Советском Союзе наиболее широко применяются устройства FEAG, представляемые в рамках СЭВ. Во многих организациях применяют "Photomation". Как видно из табл.2.2 эти устройства одного класса и имеют одинаковые технические характеристики.

Рассмотрим основные конструктивные принципы системы ввода-вывода FEAG. FEAG-200 включает три модуля:

- оптико-механическую сканирующую систему для считывания и записи изображения лазерным лучом;
- терминал оператора с пультом управления;
- контролирующую систему.

Для сканирования используется гелий-неоновый лазер, формирующий два луча - один для сканирования, второй - для записи. Причем во втором случае световой луч лазера моделируется цифровым изображением.

Лазерный луч проходит дефокусирующую систему, обеспечивающую формирование светового пятна заданного размера. Снимок (негатив или диапозитив) укрепляется на барабане над окном, которое можно изменять в соответствии с размерами снимка. За снимком находится фотоэлемент, который воспринимает излучение прошедшее через снимок и формирует электрический сигнал пропорционально плотности снимка. Возможный диапазон сигнала соответствующей плотности изображения от 0 до 2 D или от 0 до 3 D квантуется на 256 уровней и кодируется 8-битовым словом.

При записи изображения лазерный луч проходит поляризационную систему, которая изменяет его интенсивность в соответствии с значениями яркостей цифрового изображения, при этом реализуется 64 уровня яркости. Дефокусирующая система формирует необходимую форму и размер светового пятна (в соответствии с размером элемента изображения) и проектирует это пятно на фотоэмульсию, установленную на барабане. Причем осуществляется вакуумное выравнивание пленки. Скорость вращения барабана при записи и считывании строго стабилизируется. Считывание выполняется со скоростью 200 000 элементов/сек. После полного поворота барабана

Таблица 2.1

Технические характеристики электронно-механических устройств
ввода-вывода изображения

Характеристики системы	Формат-ИГО	Ромб	Photomation	FEAG
1. Максимальный размер изображения, мм	240x240	120x180	240x240	240x300
2. Шаг квантования (растр), мкм	25, 50, 100, 200	25, 50, 100	25, 50, 100, 200	10, 20, 40, 80
3. Число градаций при считывании	256	256	256	256
4. Число воспроизводимых градаций	64	64	64	64
5. Диапазон оптических плотностей (Д)	0-3,0	0-3,0	0-3,0	0-3,0

оптическая головка перемещается на ширину одного элемента. Перемещение оптической головки осуществляется шаговым двигателем и прецизионным ходовым винтом. Размер участка снимка при считывании и записи выбирается оператором. Работа "FEAG" полностью контролируется встроенной микро-ЭВМ. Специально разработанные драйверы обеспечивают совместимость устройства с ЭВМ серии СМ.

В таблице 2.2 приведено время считывания и записи изображения посредством устройства FEAG при различных размерах элемента.

Таблица 2.2

	Размер элемента (мкм)		
	10	20	40
Считывание снимка 240x240 мм	104 мин.	26 мин.	6.5 мин.
Запись изображения 240x240 мм	70 мин.	17.5 мин.	4.5 мин.

В настоящее время устройствами FEAG в плановом порядке обеспечиваются все центры цифровой обработки изображений.

Устройства ввода-вывода изображения планшетного типа с механической разверткой серийно не выпускаются. Однако изготовлено и применяется несколько вариантов экспериментальных устройств такого типа. Принцип их действия иллюстрируют рис.2.1 и 2.3. Снимок, расположенный на стекле специального столика освещается точечным источником света и равномерно перемещается вдоль одной оси прибора. Таким образом, приемник излучения расположенный под снимком последовательно "просматривает" изображение вдоль линии сканирования. Переход к следующей линии сканирования осуществляется с помощью шагового двигателя. Такие устройства обеспечивают высокую измерительную точность и их целесообразно использовать при решении фототриграмметрических задач, особенно для ввода стереопары снимков. Однако, они имеют слишком низкое быстродействие.

2.3.4. Устройства, использующие многоэлементные приемники излучения

Многоэлементные устройства, воспринимающие изображения, состоят из нескольких (от десятков до тысяч) одноэлементных приемников излучения типа фотодиодов, фоторезисторов или фототранзисторов. Эти элементы объединены в линейку (расположены вдоль одной линии) или размещены в виде равномерной решетки (матрицы). Такая матрица (линейка) размещается в фокальной плоскости объектива, формирующего изображение вводимого снимка. Каждый из элементов матрицы последовательно опрашивается и таким образом формируется видеосигнал. Если используются линейка элементов, то она перемещается последовательно "просматривая" все изображение. Размеры элементов достаточно малы (до 20x20 мкм), что обеспечивает высокую разрешающую способность системы [7].

Наиболее широко используются фотодиодные приемники на базе кремния. Линейки и матрицы такого типа содержат различное количество элементов. Например, применяют линейки из 256 элементов с шагом 25 мкм и линейки, содержащие 1875 элементов с шагом 15 мкм [7].

В последнее время для создания устройств ввода-вывода стали применять приборы с зарядовой связью (ПЗС). ПЗС состоит из совокупности конденсаторов со структурой металл-окисел-полупроводник. ПЗС имеют высокую чувствительность, обладают незначительными шумами и обеспечивают высокую разрешающую способность. Размеры элемента ПЗС могут быть значительно меньше, чем при использовании других приемников излучения. ПЗС также выполняются в виде линейек или матриц. В настоящее время выпускаются линейки состоящие из 1000 элементов (при длине 26 мм) и матрицы содержащие свыше 20000 элементов. При этом размер ячейки составляет 10-16 мкм [8].

Многоэлементные приемники излучения обеспечивают высокую геометрическую стабильность работы устройств ввода, так как положение элемента в матрице (линейке) строго фиксировано. Отклонение в положении каждого из элементов от требуемого, можно легко определить путем калибровки устройств ввода и в дальнейшем вводить поправки цифровым способом.

3. ДЕШИФРИРОВАНИЕ СНИМКОВ В СИСТЕМАХ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

3.1. Общие сведения

Дешифрирование – один из наиболее сложных и ответственных процессов обработки снимков при создании топографических карт. Дешифрирование выполняет высококвалифицированный специалист имеющий большой практический опыт такой работы. Для распознавания объектов на снимках дешифровщик выявляет дешифровочные признаки объектов анализирует всю их совокупность и принимает решение о принадлежности объекта к определенной классу. Причем во многих случаях решение принимается на "интуитивном" уровне на основе практического опыта дешифровщика. Иногда довольно сложно описать мотивы принятия каждого конкретного решения. Это, естественно, приводит к сложностям формализации процесса дешифрирования и автоматизации этого процесса в целом на основе использования цифровых вычислительных машин.

Существует два направления в развитии средств автоматизации дешифрирования:

1) создание полностью автоматических систем распознавания объектов на снимках;

2) создание интерактивных систем, в которых решение принимается ЭВМ при участии человека; при этом цифровая система самостоятельно выполняет распознавание "простых" объектов и оказывает помощь дешифровщику в сложных случаях, предоставляя целый набор средств и алгоритмов для оценки ситуации.

Заметим, что для дешифрирования топографических объектов более перспективный второй путь, который и реализуется в современных цифровых системах.

Для осуществления дешифрирования в цифровых системах необходимо:

– выделить дешифровочные признаки объекта на изображении и представить их численно;

– разработать классификатор, позволяющий на основе дешифровочных признаков и некоторого решающего правила отнести объект к тому или иному классу;

– выполнить обучение классификатора по некоторым тестовым объектам;

– выполнить дешифрирование реальных снимков.

Рассмотрим как реализуется каждый из этих этапов.

3.2. Дешифро вочные признаки

При визуальном дешифровании снимков используют прямые и косвенные дешифровочные признаки. К прямым признакам относят тон (цвет), форму, размеры, текстуру и тень. Косвенные признаки — это факторы указывающие на наличие объекта, который на снимке не изображен, но на основе взаимосвязи между объектами можно заявить о его существовании.

Для использования признаков в цифровых системах необходимо особым образом представить их в форме "доступной" ЭВМ, то есть выразить численно. Рассмотрим способы численного представления каждого из признаков.

Т о н . Цифровое изображение содержит значение яркости для каждого элемента изображения. То есть, численно выраженное значение тона для каждого элемента изображения является одним из наиболее удобных и легко получаемых признаков дешифрования в цифровых системах. Отметим, что можно использовать как собственно значение плотности некоторого элемента изображения, так и вычисляя, например, средние значения для некоторого участка изображения.

Ц в е т . Цвет в цифровых системах обычно характеризуется для каждого элемента изображения трехмерным вектором \vec{p} (ρ_1 , ρ_2 , ρ_3). Здесь ρ_1 , ρ_2 и ρ_3 — яркости соответствующего элемента каждого из трех составляющих красного, зеленого и синего для цветного цифрового изображения. Плотность элемента цветного изображения представляет сумму $d_y = d_1\rho_1 + d_2\rho_2 + d_3\rho_3$ значений координат цвета. Здесь d_i — определенным образом выбранные коэффициенты.

Т е к с т у р а . Текстура — это рисунок, структура изображения некоторого площадного объекта. Так как текстура представляет собой чередование темных и светлых тонов определенной формы мелких элементов изображения (точки, линии, прямоугольники и т.д.) очевидно, что достаточно сложно выразить текстуру математически. При этом текстура является одним из основных признаков при визуальном дешифровании площадных объектов на мелкомасштабных снимках.

Поэтому оправдано стремление использовать этот признак при цифровом дешифровании. Разработке способов математического

описания текстуры посвящено большое количество работ, описание которых можно найти в [12], [8].

Здесь рассмотрим некоторые из способов описания текстуры.

Широко используется автокорреляционная функция вычисляемая для каждой точки изображения на некотором участке (окне) размером $(2W + 1) \times (2W + 1)$ элементов изображения [12]:

$$A(\xi, \eta, j, k) = \frac{\sum_{m=j-W}^{j+W} \sum_{n=k-W}^{k+W} F(m, n) F(m-\xi, n-\eta)}{\sum_{m=j-W}^{j+W} \sum_{n=k-W}^{k+W} [F(m, n)]^2} \quad (3.1)$$

Здесь j и k - координаты точки в цифровом изображении; $\xi, \eta = 0, \pm 1, \pm \dots T$ - смещения. Отметим, что размер зерна текстуры пропорционален широте автокорреляционной функции. Поэтому в качестве численного значения текстуры используют функцию:

$$T(j, k) = \sum_{\xi=-T}^T \sum_{\eta=-T}^T \xi^2 \eta^2 A(\xi, \eta, j, k) \quad (3.2)$$

В качестве приближенной характеристики текстуры можно использовать гистограмму уровней плотности, вычисленную по некоторому участку изображения. В качестве численных признаков при этом применяют математическое ожидание, дисперсию и эксцентриситет полученного распределения плотностей на изображении.

Учитывая, что текстура - это в первую очередь чередование тонов, разумно для ее описания использовать плотность вероятностей разности уровней пар элементов в окрестностях точки. Для этого вычисляются разности в окрестности каждой точки в пределах выбранного "окна" и строят соответствующую гистограмму. В качестве численных значений используют величины [12]:

$$M = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K i p(i)$$

$$\sigma = \sum_{i=1}^K p^2(i)$$

$$p(i) = f_i (F(m, n) - F(m + \Delta x, n + \Delta y))$$

Здесь K - количество градаций на изображении. Гистограммы и указанные признаки можно вычислить для различных расстояний Δx , Δy и направлений. В результате можно получить многомерный вектор признаков текстуры.

Геометрические признаки

Ф о р м а - один из наиболее сложных для математического представления и последующего использования дешифровочный признак. Однако существуют достаточно надежные методы распознавания изображений искусственных объектов (букв, деталей машин, агрегатов, сооружений и т.д.), работа которых основана на использовании только геометрических признаков [1]. Надежность таких систем объясняется возможностью для некоторого ограниченного круга изображений искусственных объектов создать исчерпывающий класс эталонов. При дешифрировании топографических объектов возникает значительно более сложная задача.

Рассмотрим наиболее простые способы описания формы.

Широко используют топологические свойства изображения. Топологические свойства - это свойства сохраняющие инвариантность при гомеоморфном преобразовании. (Наглядно гомеоморфное преобразование обычно поясняют на примере растяжения произвольным образом некоторого рисунка на резиновой пленке. Искажения этого рисунка не будут менять его топологических свойств). Часто используется топологическое свойство - число связей компонент. На рис.3.1 показана фигура состоящая из двух связанных компонент.

Другое топологическое свойство - количество дыр в объекте. На рис.3.2 показан объект с двумя дырами. Топологию объекта часто характеризуют числом Эйлера E , определяемым как разность между числом связанных компонент C и числом дыр H :

$$E = C - H \quad (3.4)$$

Также топологическим свойством обладает число линий, сходящихся в некоторой точке.

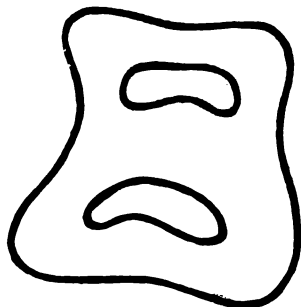
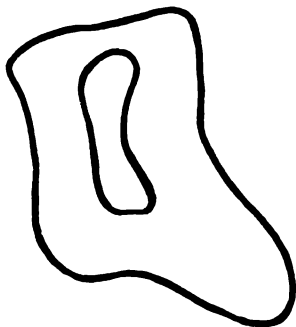


Рис.3.1. Фигура состоящая из двух
связных компонент

Рис.3.2. Фигура с двумя
"дырами"

Важным преимуществом топологических характеристик изображения объекта является то, что они не изменяются практически при любых (кроме разрывов) искажениях изображения.

Подробно ознакомиться с использованием топологических свойств можно по работе [6]. Возможны и другие описания формы. Например, в [1] предлагается система характеристик x_i , вычисляемых на основе измерения геометрических параметров изображения объекта:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= bh/S ; & x_2 &= h/b ; & x_3 &= L\sqrt{S} ; \\
 x_4 &= L/h ; & x_5 &= L/b .
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

Здесь b и h - меньшая и большая стороны минимального по площади прямоугольника, описанного вокруг изображения;

S и L - площадь и периметр изображения соответственно.

Широко используются для описания формы так называемые аналитические характеристики. Сущность способа заключается в представлении контура в виде функции кривизны в каждой ее точке. Если затем эту функцию разложить в ряд Фурье и ограничиться несколькими числами ряда, то коэффициенты Фурье будут нести существенную информацию о форме изображения.

Р а з м е р . Размер изображения объекта можно использовать как простой дополнительный признак. Причем задать размер можно как некоторое максимальное (минимальное) количество элементов, которое может содержать изображение данного объекта на снимке.

При автоматизированном дешифрировании появляется возможность использовать новые дешифровочные признаки (которых нет при визуальном дешифрировании). Таким признаком является вектор плотностей элемента изображения многозональных снимков. Как известно при многозональной съемке каждому значению изображения соответствует несколько (по числу каналов) значений яркости (B_i) в соответствующей узкой зоне спектра. Вектор яркостей $B (b_1, b_2, \dots, b_k)$ является хорошим дешифровочным признаком.

Косвенные дешифровочные признаки могут быть использованы на втором этапе автоматического дешифрирования. При этом методика их использования остается без изменений: на основе значения устойчивых взаимосвязей объектов, выделенных на изображении и прямо на опознающихся объектах делают вывод о наличии объекта на местности. Отметим, что ценность дешифровочных признаков различна с точки зрения полезности и с точки зрения затрат на машинное время. Ограничения по быстрдействию не позволяют использовать совместно всю совокупность признаков. Имеются методы выбора наиболее ценных признаков для каждого конкретного случая дешифрирования [6,4,1].

Так при дешифрировании мелкомасштабных снимков земной поверхности используют тон, цвет, текстуру, вектор плотностей многозонального изображения. Геометрические же признаки применяют редко, так как распознаваемые площадные объекты - типы лесов, полей с сельскохозяйственными культурами не имеют четкой геометрической формы и лучше всего характеризуются текстурой и тоном. В то же время при распознавании искусственных объектов, с чем при-

ходится сталкиваться при дешифрировании крупномасштабных снимков целесообразно использовать геометрические признаки. Однако до сих пор не разработано эффективной системы признаков для дешифрирования на снимках всех топографических элементов.

3.3. Статистический подход. Байесовский классификатор

Сформулируем задачу распознавания изображения некоторого объекта на снимке. Пусть требуется опознать на снимке некоторый объект, для которого получены численные значения M дешифровочных признаков. Значения дешифровочных признаков представим в виде вектора $\bar{X} (X_1, \dots, X_m)$. Причем на снимке возможно появление K типов объектов. Требуется определить тип объекта изображенного на снимке, то есть к какому из K классов (возможных типов объектов) относится данный объект.

При использовании статистического подхода необходимо знать вероятностную структуру задачи.

При этом появление на снимке конкретного объекта относящегося к j -ому классу будем считать случайным событием W_j . Множество всех возможных событий обозначим $\Omega = (W_1, W_2, \dots, W_K)$. Вектор признаков \bar{X} так же будем считать векторной случайной величиной. Такие предположения в целом хорошо соответствуют природе явления: цифровое изображение топографического объекта содержит много случайных вариаций, вызванных флуктуациями яркости объекта, состоянием атмосферы и т.д.; а появления некоторого конкретного объекта в данном месте снимка можно в полной мере считать случайным событием.

Для решения задачи распознавания статистическим методом нужно знать:

$P(W_j)$ - априорную вероятность появления объекта класса j

$P(\bar{X} / W_j)$ - функцию условной плотности распределения вероятностей вектора \bar{X} в состоянии W_j (то есть, плотность распределения вектора признаков \bar{X} , если изображенный на снимке объект относится к классу j). Если эти характеристики известны, то распознавание осуществляют на основе Байесовского решающего правила. Для этого вычисляют апостериорные вероятности событий W_j для $j = 1, 2, \dots, K$ при условии, что состояние вектора признаков есть \bar{X}

$$P(W_j/\bar{X}) = \frac{P(W_j) P(\bar{X}/W_j)}{P(\bar{X})}, \quad (3.6)$$

где

$$P(\bar{X}) = \sum_{j=1}^K P(\bar{X}/W_j) \cdot P(W_j) \quad (3.7)$$

Затем выбирают такое значение класса i для которого апостериорная вероятность $P(W_i/\bar{X})$ максимальна. То есть объект относят к классу i если

$$P(W_i/\bar{X}) > P(W_j/\bar{X}), \quad (3.8)$$

для всех $j \neq i$

Байесовское решающее правило минимизирует вероятность ошибки. На рис.3.3 приведены реальные плотности распределения яркостей трех типов пород леса.

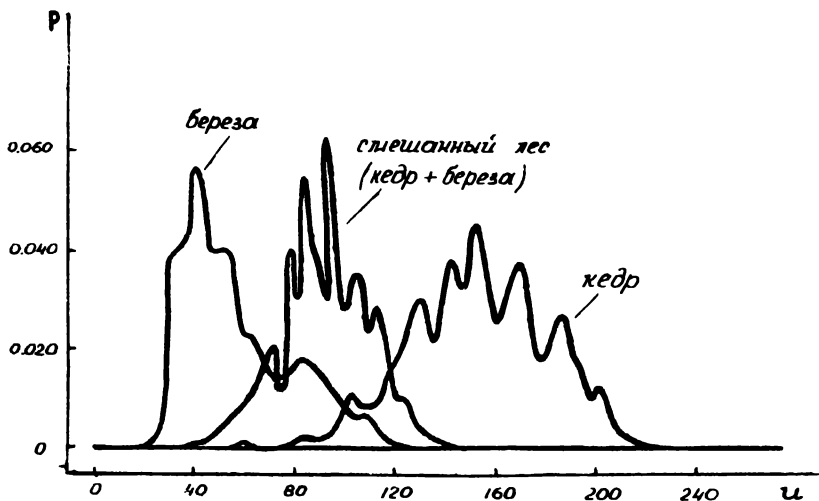


Рис.3.3

На рис.3.4 показаны границы областей решений, получаемые при использовании Байесовского классификатора. На рис.3.5 выделены области, соответствующие ошибкам распознавания при использовании Байесовского классификатора.

Когда используют правило в виде (3.8) предполагают, что каждая ошибка классификации имеет одинаковый вес. Однако бывают ситуации когда неправильная классификация какого-либо типа объектов приносит более нежелательный эффект, чем ошибки в распознавании объектов другого класса. В этом случае вводятся веса ошибок или так называемая функция потерь $\mathcal{L}(\alpha_i / W_j)$. Здесь $\mathcal{L}(\alpha_i / W_j)$ - потери связанные с принятием решения α_i (отнесения объекта к классу i), если состояние объекта есть W_j . Для такого случая Байесовское решающее правило, обеспечивающее минимум потерь, сводится к вычислению функции, называемой условным риском

$$R_i(\alpha_i / \bar{X}) = \sum_{j=1}^K \mathcal{L}(\alpha_i / W_j) P(W_j / \bar{X}) \quad (3.9)$$

и выбору i , соответствующего минимальному значению $R_i(\alpha_i / \bar{X})$. Легко видеть, что если выбрать функцию потерь вида

$$\mathcal{L}(\alpha_i / W_j) = \begin{cases} 0, & \text{для } i=j; \\ 1, & \text{для } i \neq j, \end{cases} \quad (3.10)$$

то есть ввести одинаковые веса ошибок, то условие (3.9) принимает вид (3.8).

Как уже отмечалось, для использования Байесовского классификатора необходимо знать статистические характеристики дешифровочных признаков объектов. Характеристики определяют на основе измерений дешифровочных признаков известных объектов на эталонных снимках. Этот процесс называется "обучением классификатора". При этом различают параметрический и не параметрический способ определения статистических характеристик. В первом случае считают известным вид распределения плотности вероятностей, например, предполагают, что имеет место нормальный закон распределения. Тогда определяют только параметры нормального закона распределения: математическое ожидание и дисперсию. Во втором слу -

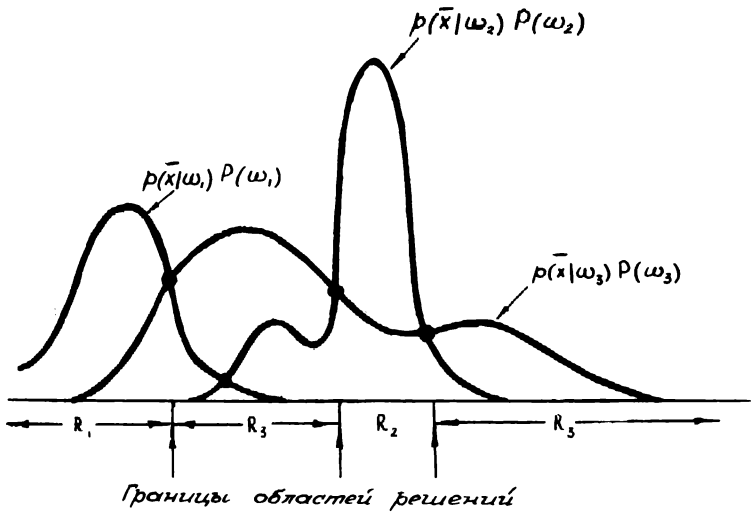


Рис.3.4. Границы областей решения при использовании Байесовского классификатора

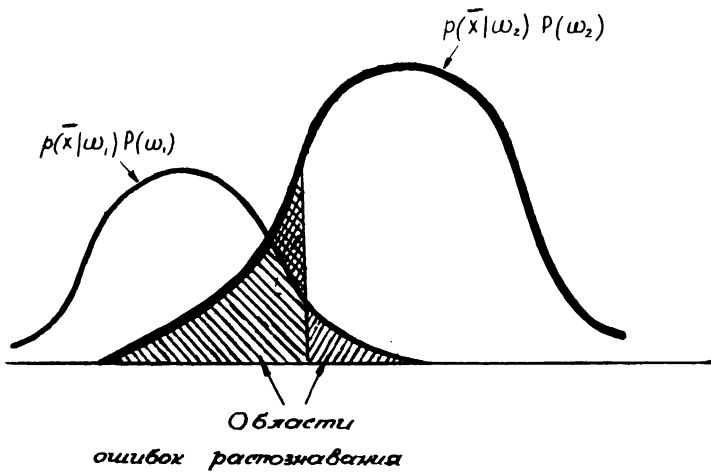


Рис.3.5. Области ошибок распознавания объектов при использовании Байесовского классификатора

чане не высказывает никаких предположений о виде распределения. Рассмотрим каждый из способов обучения классификатора.

3.4. Обучение классификатора

3.4.1. Параметрический метод

Возможно использовать несколько подходов для оценки параметров распределения по обучающим выборкам. Одним из широко используемых методов является метод максимума правдоподобия. Сущность метода заключается в том, что на основе наблюдений над случайной величиной ξ строится функция, называемая функцией правдоподобия:

$$L(\bar{\theta}, x_1, x_2, \dots, x_n) = P(\bar{\theta}, x_1) P(\bar{\theta}, x_2) \dots P(\bar{\theta}, x_n), \quad (3.11)$$

где $\bar{\theta}$ — вектор оцениваемых параметров;
 $P(\bar{\theta}, x_i)$ — вероятность того, что случайная величина равна x_i при значении вектора параметров равному $\bar{\theta}$.

Оценку максимального правдоподобия $\hat{\theta}$ определяют при условии, что функция $L(\bar{\theta}, x_1, \dots, x_n)$ принимает максимальное значение. Для этого решают уравнения вида

$$\frac{\partial \log L(\bar{\theta}, x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial \theta^j} = 0; \quad (3.12)$$

для $j = 1, 2, \dots, K$.

где K — размерность вектора $\bar{\theta}$.

($\log L$ вместо L используют для удобства вычислений, т.к. максимум функции L и $\log L$ достигают при одном и том же θ).

Рассмотрим простейший случай определения параметров данным методом. Пусть выполнен ряд измерений по изображениям объектов некоторого класса W_j и получены численные значения x_1, x_2, \dots, x_n одного децифровочного признака. Предположим, что плотность вероятностей данного признака $P(x/W_j)$ распределена по нормальному закону:

$$P(x/W_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (3.13)$$

где M - математическое ожидание;

σ^2 - дисперсия случайной величины X .

Задача состоит в оценке параметров M и σ^2 по имеющейся выборке, т.е. значениям x_1, x_2, \dots, x_k .

Применяя метод максимального правдоподобия, получим систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \log L(\bar{\theta}, x_1, x_2, \dots, x_k)}{\partial M} &= 0 \\ \frac{\partial \log L(\bar{\theta}, x_1, x_2, \dots, x_k)}{\partial \sigma^2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

Учитывая, что

$$\begin{aligned} \log L(\bar{\theta}, x_1, x_2, \dots, x_k) &= -\frac{1}{2} \log 2\pi\sigma^2 - \frac{1}{2} \frac{(x_i - M)^2}{\sigma^2} = \\ &= -\frac{k}{2} \log 2\pi\sigma^2 - \frac{1}{2\sigma^2} \sum (x_i - M)^2 \end{aligned} \quad (3.15)$$

и подставляя (3.15) в (3.14) получаем:

$$\frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^k (x_i - \hat{M}) = 0 \quad (3.16)$$

$$\sum \frac{(x_i - M)^2}{\sigma^2} = 0 \quad (3.17)$$

Отсюда легко найти оценки \hat{M} и $\hat{\sigma}^2$

$$M = \frac{1}{n} \quad (3.18)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{M})^2$$

Таким образом по полученным выборкам нужно вычислить среднее значение и дисперсию по обычным правилам.

Гораздо сложнее обстоит дело в многомерном случае. В этом случае необходимо иметь значение функции распределения для каждого из параметров при фиксировании значения других параметров. Многомерная функция нормального распределения имеет вид [6]:

$$P(\bar{X}) = \frac{1}{2\pi^{m/2} |\Sigma|^{1/2}} \exp\left[-\frac{1}{2} (\bar{X} - \bar{M})^t \Sigma^{-1} (\bar{X} - \bar{M})\right], \quad (3.19)$$

где \bar{X} - m - компонентный вектор столбец;
 \bar{M} - вектор среднего значения;
 Σ - ковариационная матрица размера $m \times m$;
 $|\Sigma|$ - детерминант матрицы Σ .

Оценка максимального правдоподобия для такого случая будет [6]:

$$\hat{M} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{X}_i ; \quad (3.20)$$

$$\hat{\Sigma} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{X}_i - \hat{M})(\bar{X}_i - \hat{M})^t$$

3.4.2. Непараметрический метод

Непараметрические методы не предполагают априорного знания закона распределения исследуемых величин. Наиболее простой пример непараметрического метода - непосредственная оценка плотности распределения $P(\bar{X} / \omega_i)$ путем построения гистограммы по всей совокупности выборок. Этот способ широко применяется практически при обучении классификатора. Гистограмму легко построить, имея набор данных и можно хранить ее в памяти ЭВМ, считая, что гистограмма и представляет собой дискретно заданную $P(\bar{X} / \omega_i)$. Сложности возникают при теоретическом обосновании того, что $\hat{P}(\bar{X} / \omega_i)$ сходится к истинной $P(\bar{X} / \omega_i)$. Проблематичен вопрос о количестве необходимых выборок и о величине ошибки такой оценки. Однако на практике можно опираться на ошибки представления $P(\bar{X} / \omega_i)$, а в целом ошибки распознавания. С помощью данного классификатора и на этом основании сделать заключение о его пригодности. Заметим, что для оценки качества рас -

познавания необходимо иметь специальный набор контрольных данных.

3.5. Кластерный анализ

Кластерный анализ позволяет выделить "естественные структуры данных", то есть свойство данных группироваться около некоторых значений (центров). Разделение данных на такие естественные группы (или классы) часто способствует установлению связи этих групп и свойств исследуемого объекта.

Для выполнения кластеризации необходимо определить такие понятия как:

- а) близость между точками внутри класса;
- б) расстояние между группами точек (кластерами);
- в) критерии кластеризации.

Рассмотрим один из типичных вариантов кластерного алгоритма, приведенного в [6]. Алгоритм содержит пять блоков.

В первом блоке выбирают начальные кластерные центры $M_{0,i}$ ($i = 1, 2, \dots, C$). Число центров C задают в соответствии с априорными сведениями о природе данных.

На втором этапе относят каждый из векторов данных \bar{X}_i к ближайшему центру классов.

Третий блок осуществляет вычисление математических ожиданий M_i ($i = 1, 2, \dots, C$) для каждой группы данных, составляющих кластер.

В четвертом блоке сравнивают значения начальных кластерных центров $M_{0,i}$ и полученные математические ожидания соответствующего кластера. Если $M_{0,i} - M_i < \epsilon p S$, то переходят к пятому блоку. В противном случае процедура повторяется со второго этапа. При этом принимают $M_0 = M_i$.

В качестве расстояния можно использовать различные меры в зависимости от того какому компоненту данных придается большее значение. Довольно часто используют обычное евклидово расстояние, вычисленное в пространстве признаков.

В качестве критерия кластеризации используется среднеквадратическое отклонение

$$\bar{\sigma} = \sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^{N_i} \|X_j - M_i\|^2,$$

- где M_i - вектор математического ожидания для i -го кластера;
- X - векторы данных принадлежащие i -ому кластеру;
- C - количество кластеров;
- K - количество точек в кластере.

Минимизируя \bar{b} , получаем кластеры имеющие максимально возможную плотность, так как в этом случае минимизируются расстояния между вектором измерений и значением M_i соответствующего кластера.

В пятом блоке выполняется проверка разделимости кластеров. В случае, если некоторые кластеры расположены слишком близко, то осуществляется объединение соседних кластеров и еще раз повторяется процесс кластеризации. Таким образом алгоритм кластеризации итеративный и заканчивается в случае, если математические ожидания кластеров, полученные из различной итерации совпадают (в пределах некоторого допущения ϵPS).

На рис.3.6 представлена блок-схема алгоритма кластерного анализа.

Итак, мы рассмотрели два подхода к выбору классификатора: статистический (Байесовский классификатор) и детерминированный (на основе кластерного анализа).

Первый - более строгий теоретически, однако на практике бывает сложно и дорого определять статистические характеристики признаков объектов или же они могут быть определены с большими ошибками.

Второй способ не требует дорогостоящего "обучения" классификатора, однако полученный результат нельзя проверить и оценить ошибки в результате применения данного метода.

4. УСТРАНЕНИЕ ИСКАЖЕНИЙ ИЗОБРАЖЕНИЯ ЦИФРОВЫМИ МЕТОДАМИ

4.1. Модели ошибок

Совершенствование съемочной аппаратуры, процесса съемки и обработки снимков постоянно повышают качество получаемого изображения, приближая его к идеальному. Для аэрофотографического изображения можно сформулировать основные свойства идеальной съемки:

- а) линейная передача яркостей в заданном диапазоне;

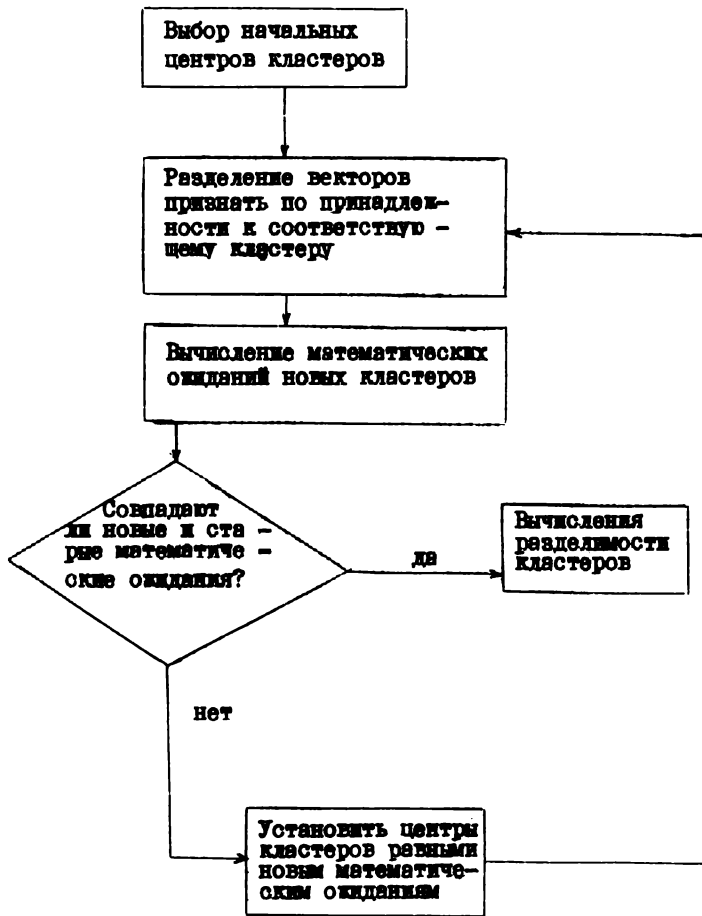


Рис.3.6. Блок-схема алгоритма кластерного анализа

б) импульсный отклик в виде дельта-функции Дирака $\delta(x, y)$, отсутствие смаза вследствие идеального импульсного отклика;

в) геометрия в соответствии с законом центральности проецирования.

Однако реальный съемочный процесс не обеспечивает выполнения этих условий. Причем вследствие разных причин:

- несовершенство съемочной системы;
- отличие условной съемки от требуемых;
- условиями обработки.

Все отличия снимка от снимка, полученного при идеальной съемке, будем считать искажениями или ошибками снимка.

Цифровые методы позволяют устранить или же уменьшить довольно широкий круг ошибок снимка. Для этого необходимо знать закон влияния ошибок на изображение и получить математическую модель устранения ошибок изображения.

Искажения изображения рассмотрим в рамках трех моделей, описывающих соответственно фотометрически, резкостные и геометрические свойства систем формирующих изображения.

Фотометрическая модель характеризует свойство системы передавать яркостные различия. В фотографии это свойство описывается характеристической кривой, а в общем случае можно ввести понятие "функция тонопередачи":

$$B = f(E) \quad (4.1)$$

Здесь E - освещенность; B - яркость изображения. Для идеальных систем функция тонопередачи должна быть линейной, то есть

$$B = kE \quad (4.2)$$

где k - некоторый коэффициент.

Заметим, что нелинейность функции тонопередачи может быть вызвана различными причинами: состоянием атмосферы, несовершенством оптической системы, нелинейностью характеристической кривой используемого фотоматериала, неравномерностью освещения (например при изготовлении диапозитива) и т.д. Однако, природа явления в данном случае не имеет значения и важным является лишь результат - то есть фактический вид функции тонопередачи.

Для изучения искажений влияющих на изображение мелких деталей воспользуемся следующей моделью процесса формирования изображения:

$$F(x, y) = \int_{\alpha=-\infty}^{\infty} \int_{\beta=-\infty}^{\infty} E(x, y) H(x, y, \alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad (4.3)$$

Здесь $E(x, y)$ - исходное распределение яркостей объекта;
 $F(x, y)$ - функция описывающая распределение яркостей полученного изображения;
 $H(x, y, \alpha, \beta)$ - импульсный отклик реальной системы формирующей изображения.

Для пространственно-инвариантной системы импульсный отклик не зависит от координат x, y и тогда (4.3) можно представить в виде интеграла свертки

$$\begin{aligned} F(x, y) &= \int_{\alpha=-\infty}^{\infty} \int_{\beta=-\infty}^{\infty} H(x-\alpha, y-\beta) E(x, y) d\alpha d\beta = \\ &= H(x, y) * E(x, y) \end{aligned} \quad (4.4)$$

Резкость изображения определяется видом функции $H(x, y)$ (В фотографии функция $H(x, y)$ называется функцией рассеяния точки). Импульсный отклик характеризует свойства всего съемочного процесса, включая состояние атмосферы, оптический канал съемочной системы, свойства фотоматериала импульсного отклика. Импульсный отклик характеризует также и смаз изображения вызванный, например, вибрацией, перемещением носителя во время эксплуатации фотоматериала и т.д.

Цифровая коррекция такого рода искажений сводится к обработке вида (4.4), при которой изменяется импульсный отклик всей системы формирования изображения.

Геометрическая модель устанавливает связь между координатами точек снимка и местности (объекта). Геометрическая модель ошибок определяет отклонения в положении точек на снимке от их положения на снимке, полученном идеальной

системой. Например, идеальная фотографическая система формирует изображение по закону центрального проектирования. Идеальное устройство ввода-вывода осуществляет ортогональное проектирование.

Таким образом, геометрическая модель ошибок связывает координаты идеального и реального изображений

$$\left. \begin{aligned} x' &= f_1(x, y) \\ y' &= f_2(x, y) \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

Здесь x', y' — координаты точки идеального изображения;
 x, y — координаты соответствующих точек реального изображения;

$f_1(x, y)$ и $f_2(x, y)$ — некоторые функции.
 Иногда модель ошибок представляют в другом виде:

$$\left. \begin{aligned} \delta x &= f_1'(x, y) \\ \delta y &= f_2'(x, y) \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

$$\delta x = x - x' \quad ; \quad \delta y = y - y'$$

где $\delta x, \delta y$ — ошибки в соответствующих точках снимка.

Для некоторого типа ошибок известен вид функции $f_1(x, y)$ и $f_2(x, y)$ и величины ошибок легко определить. Однако в большинстве случаев вид функции и величины ошибок определяют в процессе калибровки.

Задача цифровой коррекции геометрических искажений заключается в изменении положения элементов изображения в соответствии с соотношением (4.6). Очевидно, что для этого нужно знать вид функции ошибок.

Итак, для осуществления цифровой коррекции снимков необходимо знать величины ошибок и параметры моделей ошибок.

4.2. Принципы цифровой коррекции

Рассмотрим некоторые методы цифровой коррекции фотометрических, резкостных и геометрических искажений.

4.2.1. Устранение нелинейности функции тонопередачи

Пусть $f(E)$ — функция тонопередачи реальной системы. Требуется по исходному изображению $F(x, y)$ получить исправленное $F_0(x, y)$ соответствующее идеальной функции тонопередачи.

Для этого требуется выполнить яркостное поэлементное преобразование изображения:

$$B = f'_1(B), \quad (4.7)$$

где $f'_1(B)$ функция, такая, что

$$f'_1(f(E)) = E \quad (4.8)$$

Если функцию задать таблично, то наиболее простой способ осуществления коррекции — составить перекодировочную таблицу в которой каждому уровню яркости исходного изображения

$F(x, y)$ соответствует уровень яркости преобразованного изображения, вычисляемого по формуле (4.6).

4.2.2. Улучшение резкостных свойств изображения

Наиболее легким для понимания являются идеи инверсной фильтрации.

Предположим, что исходное изображение $F(x, y)$ получено путем пропускания идеального изображения $F(x, y)$ через систему с импульсным откликом $H(x, y)$:

$$F(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F_0(x-d, y-d) H(x-d, y-d) dd d\beta \quad (4.9)$$

Сущность метода заключается в выполнении цифровой фильтрации изображения $F(x, y)$, причем импульсный отклик фильтра

$H_r(x, y)$ должен быть подобран таким образом, чтобы на выходе было получено изображение $F'(x, y)$ соответствующее

щее идеальному:

$$F'(x, y) = F(x, y) * H_r(x, y) \quad (4.10)$$

Идея получения такого фильтра заключается в следующем. Частотный спектр полученного изображения согласно теореме о свертке можно записать в виде

$$F(W_x, W_y) = F_o(W_x, W_y) \cdot H_r(W_x, W_y) \quad (4.11)$$

Учитывая (4.9), запишем

$$F'(W_x, W_y) = F_I(W_x, W_y) H(W_x, W_y) H_r(W_x, W_y) \quad (4.12)$$

Легко видеть, что спектр преобразования изображения будет соответствовать спектру идеального изображения, если импульсный отклик системы выбрать:

$$H_r(W_x, W_y) = \frac{1}{H(W_x, W_y)} \quad (4.13)$$

Таким образом теоретически возможно восстановить точное изображение $F(x, y)$, искаженное системой с импульсным откликом $H(x, y)$.

Решение задачи состоит из следующих этапов.

I. По исходному изображению $F(x, y)$ посредством устройства ввода получают цифровое изображение:

$$F_p(x, y) = \sum_{j_1=-J_1}^{J_1} \sum_{j_2=-J_2}^{J_2} F_I(x, y) H_\delta(x - j_1 \Delta x, y - j_2 \Delta y) \quad (4.14)$$

Здесь $H_b (x, y)$ - импульсный отклик устройства ввода, заданный дискретно.

2. Вычисляют частотные характеристики корректирующего фильтра $H_r (W_x, W_y)$.

При этом следует учесть искажения, вносимые устройством ввода

$$H_r (W_x, W_y) = \frac{1}{H (W_x, W_y) H_b (W_x, W_y)} \quad (4.15)$$

Для получения функции $H (W_x, W_y)$ и $H_b (W_x, W_y)$ выполняют преобразование Фурье соответствующих импульсных откликов:

$$H (W_x, W_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} H(x, y) \exp\{-i(W_x x + W_y y)\} dx dy \quad (4.16)$$

$$H_b (W_x, W_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} H_b(x, y) \exp\{-i(W_x x + W_y y)\} dx dy \quad (4.17)$$

3. Находят импульсный отклик инверсного фильтра, как обратное преобразование Фурье

$$H_r(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \iint_{-\infty}^{\infty} F(W_x, W_y) \exp\{i(W_x x + W_y y)\} dW_x dW_y \quad (4.18)$$

4. Выполняют цифровую фильтрацию изображения $F_p(x, y)$

$$F_p(x, y) = F_p(x, y) * H_R(x, y) \quad (4.19)$$

5. Посредством устройства ввода формирует результирующее изображение:

$$F_R(x, y) = F_p(x, y) * R(x, y) \quad (4.20)$$

где $R(x, y)$ - импульсные характеристики восстанавливающего фильтра в виде (2.21) или (2.22).

Рассмотрим как выполняются вычислительные операции.

Исходной информацией для вычислений являются:

- матрица цифрового изображения $F_{N \times N}$ размером $N \times N$, полученная посредством устройства ввода;
- импульсный отклик искажающей системы $H(x, y)$, который после дискретизации с шагом $\Delta x, \Delta y$ представлен также в виде матрицы размером $K \times K$ элементов H_{kk} . Здесь K - определяется шириной импульсного отклика;
- импульсный отклик устройства ввода, заданный также в виде матрицы H_p размером $\ell \times \ell$.

Дискретное преобразование Фурье выполняется в соответствии с формулой

$$\tilde{H}(W_x, W_y) = \frac{1}{K} \sum_{n_1=0}^{K-1} \sum_{n_2=0}^{K-1} H(n_1, n_2) \exp \left\{ -\frac{2\pi i}{K} (W_x n_1 + W_y n_2) \right\} \quad (4.21)$$

где $H(n_1, n_2)$ - элемент матрицы H с номером n_1, n_2
 $\tilde{H}(W_x, W_y)$ - элемент матрицы \tilde{H} с номером (W_x, W_y) .
 Матрица \tilde{H} описывает спектр формулой H и имеет $2 \times N^2$ элементов.

Аналогично выполняется обратное преобразование Фурье и получается импульсный отклик инверсного фильтра $H_{R, KK}$

Дискретная свертка (4.19) выполняется в соответствии с соотношением

$$F_R(i, j) = \sum_{i_1=1}^{n_1} \sum_{j_1=1}^{n_2} F(i, j) H_R(n_1 - i + 1; n_2 - j + 1) \quad (4.22)$$

Здесь $n_1, n_2, i, j = 1, 2, \dots, N$;

$F(i, j)$ - элемент матрицы F с номером i, j ;

$F_R(i, j)$ - соответственно элемент результирующей матрицы F_R .

Отметим, что дискретное представление функции $F(x, y)$ представление функции $H(x, y)$ конечным числом отсчетов приводят к ошибкам вычислений. Фактически точность цифровых методов определяется размерами элемента изображения и ошибки представления функции $H(x, y)$ не играют решающей роли.

Реализация инверсной фильтрации на практике осложнена тем, что любое изображение имеет так называемый шум - случайные флуктуации яркости, вызванные, например, зернистостью пленки. В таком случае процесс искажения в системе формирования изображения можно представить в виде:

$$F(x, y) = F_0(x, y) * H(x, y) + N(x, y) \quad (4.23)$$

где $N(x, y)$ - аддитивный случайный шум, имеющий нормальный закон распределения.

Тогда изображение, полученное в результате инверсной фильтрации

$$\hat{F}_R(x, y) = [\bar{F}_1(x, y) * H(x, y) + N(x, y)] * H_R(x, y) \quad (4.24)$$

будет содержать ошибки

$$N(x, y) * H_R(x, y) \quad (4.25)$$

которые могут достигать существенного значения на малых пространственных частотах, что вызовет значительные искажения мелких деталей. Таким образом, инверсный фильтр не является оптимальным в реальных условиях при наличии шума в изображении.

Для решения задачи восстановления изображения разработаны другие способы, позволяющие подавлять шум и получать результаты, приемлемые на практике.

4.2.3. Геометрическая коррекция

Геометрические искажения вызывают смещение отдельных элементов в изображении на величины ошибок δx , δy . Сущность цифровой коррекции заключается в вычислении истинных координат элемента изображения и перестановке его в матрице цифрового изображения как это показано на рисунке 4.1.

Однако на практике возникает множество проблем, например:

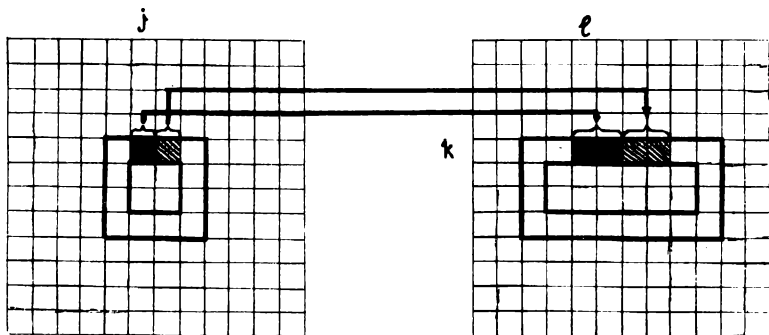


Рис.4.1. Сущность цифровой геометрической коррекции

- элемент изображения имеет конечные размеры и смещение возможно только на величины, равные размеру элемента;

- элементы вследствие влияния ошибок смещаются на различные величины и возникает проблема наложения элементов, с другой стороны возникает проблема "пустых" элементов и, естественно, все это приводит к возможности появления ложных контуров.

На практике вводят некоторое пороговое значение

$\delta x_n = \delta y_n \leq \Delta x = \Delta y$, которое служит критерием смещения положения элемента в изображении.

Если функции ошибок f_1 , f_2 известны, то значение исправленных координат вычисляют непосредственно по формулам (4.5):

$$k = f_1(i, j) \quad (4.26)$$

$$l = f_2(i, j)$$

для $i, j = 1, \dots, N$.

Здесь i, j - значения координат элемента в исходном изображении;

k, l - координаты соответствующего элемента в исправленном изображении.

Затем вычисляют яркость элемента с координатами k, l , интерполируя яркости соседних элементов. Интерполирование выполняют в соответствии с формулой [12]:

$$F(k, l) = \sum_m \sum_n F(m, n) R(x - m\Delta x, y - n\Delta y) \quad (4.27)$$

Здесь $R(x, y)$ - интерполирующая функция, обычно функция Бесселя или sine -функция.

Отметим, что проблема оптимальной интерполяции не решена [12].

Обычно вид функции f_1 и f_2 не известен и тогда геометрическая коррекция выполняется в два этапа. Для описания геометрических ошибок используют полиномиальные модели вида:

$$\left. \begin{aligned} x' &= C_0 + C_1 x + C_2 y + C_3 xy + C_4 x^2 \dots \\ y' &= \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 y + \beta_3 xy + \beta_4 x^2 \dots \end{aligned} \right\} \quad (4.28)$$

Здесь x' , y' - исправленные координаты;
 β , C - коэффициенты полинома.

Для цифрового изображения выражение (4.28) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} \kappa &= C_0 + C_1 j + C_2 i + C_3 ij + C_4 i^2 \dots \\ \rho &= \beta_0 + \beta_1 j + \beta_2 i + \beta_3 ij + \beta_4 i^2 \dots \end{aligned} \right\} \quad (4.29)$$

На первом этапе определяют коэффициенты полинома. Для это - го необходимо знать истинное значение координат для некоторых элементов изображения и решить систему уравнений вида:

$$A_1 \bar{X}_1 + L_1 = 0 \quad ; \quad A \bar{X}_2 + L_2 = 0, \quad (4.30)$$

где

$$L_1 = (l_1, l_2, \dots, l_n) \quad (4.31)$$

$$L_2 = (k_1, k_2, \dots, k_n)$$

$$X_1' = (C_0, C_1, \dots, C_{n-1})$$

$$X_2' = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{n-1})$$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & j_1 & i_1 & i_1 j_1 & i_1^2 \\ 1 & j_2 & i_2 & i_2 j_2 & i_2^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & j_n & i_n & i_n j_n & i_n^2 \end{pmatrix} \quad (4.32)$$

То есть определяют коэффициенты полиномов так же, как это обычно выполняют в фотограмметрии при исключении деформации сети фото - триангуляции.

На втором этапе по формулам (4.29) вычисляют исправленные значения координат элементов и определяют яркость полученного элемента путем интерполирования в пределах пересечения соседних элементов изображения.

5. ЯРКОСТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Цифровая обработка снимков открывает широкие возможности яркостного преобразования изображений с целью улучшения его визуального восприятия, выделения дешифровочных признаков, устранения ошибок, вносимых в изображение на различных этапах. При этом можно использовать процедуры, воздействующие лишь на отдельные элементы изображения;

- процедуры последовательно обрабатывающие окрестности каждого элемента изображения;

- процедуры, воздействующие на яркости всех элементов снимка в целом.

В целом яркостные преобразования можно представить как получение некоторого изображения $F'(x, y)$ путем воздействия некоторого оператора Q на яркости исходного изображения:

$$F'(x, y) = Q(F(x, y)) \quad (5.1)$$

Среди наиболее часто используемых преобразований можно отметить следующие:

- изменение контраста (всего изображения или отдельного фрагмента);

- устранение шумов;

- подчеркивание границ и выделение контуров;

- псевдораскрашивание изображения;

- формирование ложных цветов для отдельных объектов.

Рассмотрим принципы выполнения каждого из преобразователей.

5.1. Изменение контраста

Цель преобразования - повышение контраста изображений отдельных объектов на снимке. При этом для наиболее информативной части яркостей снимка можно изменить масштаб шкалы яркостей и таким образом увеличить ширину диапазона воспроизведения этих яркостей.

На рис.5.1 показаны возможные варианты изменения яркостей с целью изменения контраста. При этом используют как линейные,

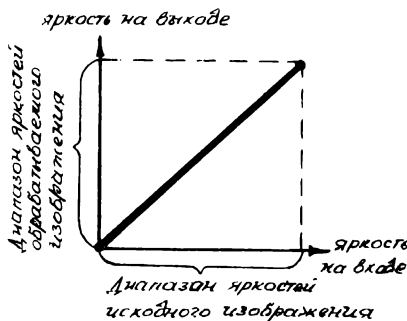


Рис.5.1. Линейное контрастирование

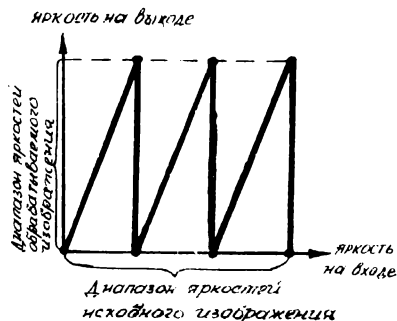


Рис.5.2. Пилообразное контрастирование

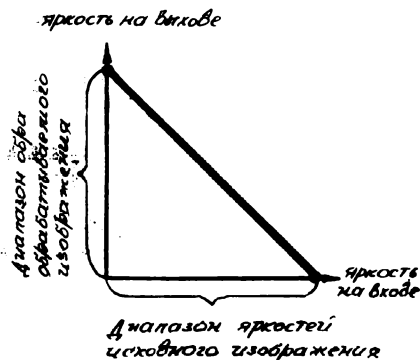


Рис.5.3. Преобразование негатива в позитив

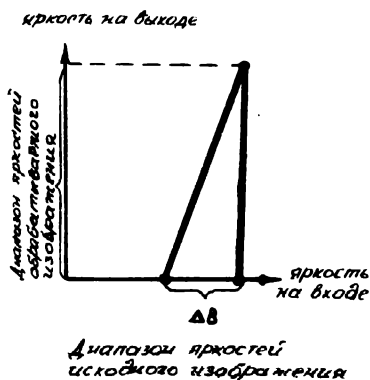


Рис.5.4. "Растягивание" диапазона

так и нелинейные преобразования. Возможно, например, воспроизвести весь яркостный диапазон "по-частям", производя так называемое пилообразное контрастирование (рис.5.2). Можно изменить негативное изображение на позитивное и наоборот, выполнив преобразование, график которого показан на рис.5.3. Возможно и просто ограничить используемый диапазон яркостей и "растянуть" его на весь воспроизводимый диапазон (рис.5.4).

Итак, изменение контраста одно из наиболее часто используемых преобразований и позволяет улучшить визуальное восприятие объектов на снимке, имеющих определенный диапазон яркостей.

5.2. Устранение шумов

Процесс получения изображения и последующего преобразования его в цифровую форму сопровождается различными шумами каналов передачи изображения: устройствами ввода-вывода, системой аэрофотоаппарат + атмосфера, фотохимической обработкой. Шумы на изображении обычно проявляются в виде значительных изменений яркостей отдельных элементов (точек). Визуально шум воспринимается в виде отдельных не связанных между собой темных или ярких точек различных размеров.

Алгоритмы устранения шумов основаны на том, что отдельные изменения яркости, создающие шум не коррелированы между собой и значения яркостей элементов шума существенно отличаются от окружающих.

Сущность наиболее простого способа устранения шума заключается в следующем: вычисляют яркость группы элементов, соседних к элементу, "проверяемому на шум". Если яркость элемента превосходит среднюю яркость группы элементов его окрестности, то считают, что этот элемент представляет собой шум и ему присваивается значение яркости, равное средней яркости группы элементов.

Шум можно устранить также методами низкочастотной фильтрации.

Для этого вычисляют свертку исходного массива со сглаживающим массивом H размером $L \times L$. В соответствии с (4.22) имеем

$$Q(m_1, m_2) = \sum \sum F(n_1, n_2) H(m_1 - n_1 + 1; m_2 - n_2 + 1) \quad (5.2)$$

При этом сглаживающие массивы, называемые "маской", имеют различный вид. Так в работе [12] рекомендуется использовать маски следующих типов:

маска 1

$$H = \frac{1}{9} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \quad (5.3)$$

маска 2

$$H = \frac{1}{10} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \quad (5.4)$$

маска 3

$$H = \frac{1}{16} \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{vmatrix} \quad (5.5)$$

Для определенных типов шумов можно подобрать оптимальную маску и использовать ее при обработке снимков, имеющих аналогичное происхождение шума.

5.3. Подчеркивание границ

Подчеркивание границ выполняется для улучшения визуального восприятия изображения, а также как необходимый шаг предварительной обработки для выделения геометрических дешифровочных признаков.

Подчеркивание границ можно осуществить, выполняя высокочастотную фильтрацию. При этом используют маски следующего вида [12]:

маска 1

$$H = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{vmatrix} \quad (5.6)$$

маска 2

$$H = \begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix} \quad (5.7)$$

маска 3

$$H = \begin{vmatrix} I & -2 & I \\ -2 & 5 & -2 \\ I & -2 & I \end{vmatrix} \quad (5.8)$$

Также широко используются для подчеркивания границ дифференциальные операторы, которые осуществляются различными способами. Например, улучшенное в таком смысле изображение можно получить, вычисляя каждый элемент как:

$$G(j, k) = F(j, k) / \sigma(j, k) \quad (5.9)$$

где $\sigma(j, k)$ – среднеквадратические отклонения яркости, вычисленные в некоторой окрестности элемента с координатами j, k :

$$\sigma^2(j, k) = \sum_j \sum_k [F(j, k) - \bar{F}(j, k)]^2$$

Здесь $\bar{F}(j, k)$ – среднее значение яркостей вычисленное в той же окрестности точки k, j .

5.4. Раскрашивание изображений и преобразование цвета

Можно выделить три вида преобразований с получением в результате цветного изображения:

- формирование псевдоцветов (раскрашивание черно-белого изображения с целью лучшего восприятия отдельных деталей);
- формирование цветного изображения с ложной передачей цвета (при этом исходным является цветное изображение с истинной передачей цвета);
- формирование цветного изображения с истинной или ложной передачей цвета по многозональным изображениям.

Псевдоцветное раскрашивание выполняется для улучшения визуального восприятия черно-белого изображения. Для выполнения такой операции весь диапазон плотностей изображения разбивают на несколько диапазонов и каждому из диапазонов ставят в соответствие вектор цвета ρ_j ($\rho_{1j}, \rho_{2j}, \rho_{3j}$), изменяя при этом яркости основных цветов ρ_1, ρ_2, ρ_3 . Таким образом

Каждому диапазону плотностей будет соответствовать определен - ный цвет на результирующем изображении.

Формирование ложных цветов осуществляется путем переори - свивания координатам цвета ρ_{1j} , ρ_{2j} , ρ_{3j} других значе - ний. В этом случае исходным служит исходное цветное изображе - ние ρ (ρ_1 , ρ_2 , ρ_3). Изменение цветов осуществляется с целью выделить какие-либо детали изображения, например, опо - знанные объекты можно окрасить в какой-либо яркий цвет (напри - мер, красный) и т.д. Получение цветных изображений по черно - белым зональным цифровым изображениям осуществляется следующим образом. Вектор цвета формируется на основе значения яркостей зональных изображений, при этом, если координата цвета ρ_i соответствует спектральной зоне данного изображения, то полу - чает изображение в истинных цветах. В противном случае форми - руется цветное изображение в ложных цветах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на большое количество выполняемых исследований до настоящего времени не создано цифровой измерительной стерео - фотограмметрической системы. Не решен ряд теоретических и прак - тических проблем, связанных с идентификацией точек стереопары и автоматической рисовкой горизонталей. Вероятно в ближайшее вре - мя следует ожидать появления "гибридных" систем, объединяющих аналитический универсальный прибор и цифровую интерактивную си - стему обработки изображений. При этом задача автоматической ри - совки рельефа и задача автоматического дешифрирования снимков, по-нашему мнению, должны решаться в рамках единого подхода. Од - нако, рассчитывать на полностью автоматическую обработку сним - ков не приходится, а следует ориентироваться на появление инте - рактивных комплексов, в которых оператор будет неотъемлемым звеном системы. При этом повышение производительности будет обеспечиваться за счет автоматизации всего процесса обработки и автоматического выполнения отдельных его этапов.

Если в цифровых методах стереофотограмметрии существует много проблем, то задачи цифровой обработки одиночного снимка в большей мере решены. Применение цифровых методов для обработки снимков в производственных организациях задерживается по следу - ющим причинам:

- из-за высокой стоимости используемого оборудования;

- отсутствие серийных стандартных комплексов цифровой обработки снимков;

- отсутствие технологии использования цифровых методов в аэрогеодезическом производстве.

Учитывая, что стоимость вычислительной техники постоянно снижается можно рассчитывать на появление сравнительно недорогих систем цифровой обработки (40-50 тыс.руб.). От применения таких систем для обработки одиночных снимков следует ожидать:

- повышения производительности труда при камеральном дешифрировании;

- повышения производительности труда при трансформировании снимков (за счет увеличения коэффициента трансформирования);

- повышения производительности труда при составлении плановой части карты, которое можно выполнять непосредственно в режиме дешифрирования снимка;

- удобство редактирования плановой части карты;

- удобство последующего хранения оригинала карты в виде цифровых данных и вследствие этого уменьшение затрат при обновлении карт.

Все вышесказанное относится к составлению и обновлению мелкомасштабных карт. Возможности использования цифровых методов для составления крупномасштабных карт практически не изучены и требуют скорейшего и детального исследования. Среди проблем, подлежащих исследованию отметим следующие:

1) определение оптимальной системы дешифрировочных признаков для автоматического дешифрирования топографических объектов;

2) цифровое трансформирование с большим коэффициентом увеличения и устранения перспективных искажений, вследствие высот зданий;

3) разработка технологии составления крупномасштабных карт цифровыми методами.

ЛИТЕРАТУРА

1. АЛЕКСЕЕВ А.С., ГУК А.П., ЖУРКИН И.Г., ПЯТКИН В.П. Цифровая измерительная картографическая система. В кн. *Обработка изображений и дистанционные исследования*.
2. АНИСИМОВ Б.В., КУРТАНОВ В.Д., ЗЛОБИН В.К. Распознавание и цифровая обработка изображений. - М.: Высш.шк., 1983. - 295 с.
3. БЫКОВ Р.Е., ГУРЕВИЧ С.Б. Анализ и обработка цветных и объемных изображений. - М.: Радио и связь, 1984. - 248 с.
4. Дистанционное зондирование: количественный подход / Ш.М.ДЕЛОВИС, Д.А.ЛАНДТРЕБЕ, Т.Л.ФИЛИНС и др. Под ред.Ф.СВЕИЧА и Ш.ДЕИВИС. - М.: Недра, 1963. - 415 с.
5. ГИМЕЛЬФАРБ Г.Д. Аппаратные средства и особенности программного обеспечения диалоговой цифровой обработки изображений. *Зарубежная радиоэлектроника*, 1985, № 10, с.87-128.
6. ДУДА Р., ХАРТ П. Распознавание образов и анализ сцен. - М.: Мир, 1976. - 511 с.
7. ЕЛИЗАРЕНКО А.С., СОЛОМАТИН В.А., ЯКУШЕНКОВ Ю.Г. Оптико-электронные системы в исследованиях природных ресурсов.
8. ЖИЗВИЧИН А.Н., СОКОЛОВ В.С. Дешифрирование фотографических изображений. М.: Недра, 1980. - 253 с.
9. МАЛИНИН В.В. Техническое обеспечение систем автоматизированного проектирования. - Н., НИИГАиК: 1984, 42 с.
10. МИШЕВ Д. Дистанционные исследования Земли из космоса. - М.: Мир, 1985. - 232 с.
11. ПРЭТТ У. Цифровая обработка изображений. - М.: Мир, 1982. - Кн.1 - 312 с.
12. ПРЭТТ У. Цифровая обработка изображений. - М.: Мир, 1982. - Кн.2 - 480 с.
13. ФРИЗЕР Х. Фотографическая регистрация информации. - М.: Мир, 1978. - 670 с.
14. Цифровое кодирование телевизионных изображений / И.И. ЦУККЕРМАН, Б.М.КАЦ, Д.С.ЛЕБЕДЕВ и др. Под ред.И.И.Цуккермана. - М.: Радио и связь, 1981. - 240 с.

Описание процесса формирования изображения посредством интеграла свертки

Импульсный отклик $H(x, y)$ - это реакция системы на единичный сигнал. Для идеальных систем импульсный отклик имеет вид Дельта-функции Дирака $\delta(x, y)$ (рис. I.1).

Импульсный отклик оптической системы - изображение точечного светового источника - функция рассеяния точки. На рис. I.2 показана реальная функция рассеяния точки $H(x, y)$. Представим, что оптическая система изображает ряд точек, расположенных как показано на рис. I.3. Каждая из точек формирует собственную функцию рассеяния (рис. I.4 - рис. I.7). Очевидно, что результирующая яркость полученного изображения равна суммарной яркости от воздействия тоочечных источников, то есть яркость точки 3 будет сумма сигналов 1, 2, 4 и 5.

Таким образом для определения яркости изображения сформированного оптической системой необходимо выполнить "суммирование со сдвигом" произведений импульсного отклика системы (функции рассеяния точки) и функции яркости исходного изображения. Это и осуществляет интеграл свертки:

$$F_p(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} F(x, y) H(x-\alpha, y-\beta) d\alpha d\beta \quad (1)$$

Дискретное представление имеет вид:

$$F_p(x, y) = \sum_{j_1=-J_1}^{J_1} \sum_{j_2=-J_2}^{J_2} F(x, y) H(x-j_1 \Delta x; y-j_2 \Delta y) \quad (2)$$

Краевой эффект проявляется в размазывании краев изображения за счет конечной ширины ФРТ. Легко представить искажения при замене бесконечного предела интегрирования в (1) на конечный. Это вызывает ошибки в нескольких крайних элементах изображения (в пределах ширины импульсного отклика).

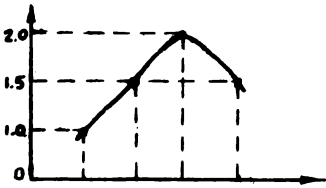


рис. 1.3

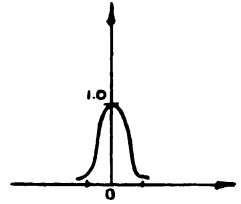


рис. 1.2

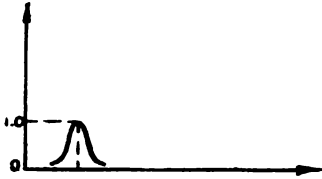


рис. 1.4

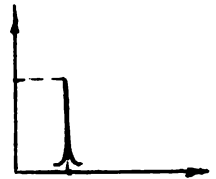


рис. 1.1

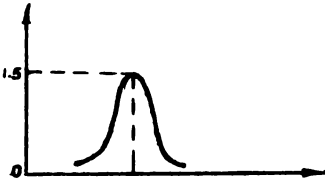


рис. 1.5

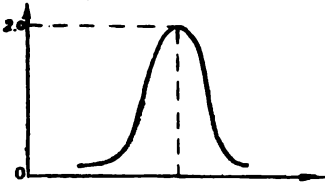


рис. 1.6

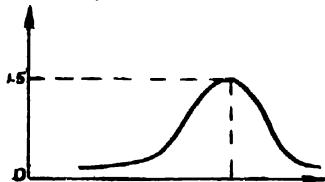


рис. 1.7

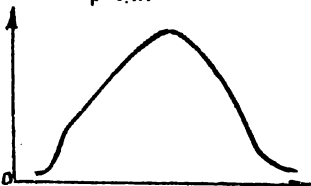


рис. 1.8

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СНИМКОВ

Учебное пособие для студентов специальности 1303
Новосибирского института инженеров геодезии,
аэрофотосъемки и картографии

АЛЕКСАНДР ПЕТРОВИЧ ГУК

Темплан 1986, п.295

Ответственный редактор П.Д.ГУК
Технический редактор К.А.БАКАНОВА
Корректор Г.В.ПЕРЕСКОКОВА

Подписано в печать 19.12.86 МН 01746
Формат 60x84 1/16 . Картографическая № 1. Ротапринт.
Объем 5,0 печ.л., 4,8 уч.-изд.л.
Тираж 500 : Заказ 26. Цена 18 к.

Редакционно-издательский отдел НИИГАиК,
630108, Новосибирск, 108, Плехотного, 10.
Картопечатная лаборатория НИИГАиК,
630108, Новосибирск, 108, Плехотного, 8.